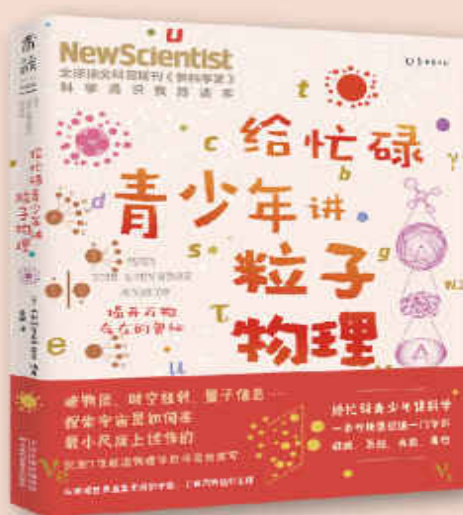


未^A讀^{DR}

给所有人的 物理入门课



从量子到天体 1分钟学物理

总 目 录

[1分钟物理](#)

[1分钟物理：“中科院物理所”趣味科普专栏·第2辑](#)

[薛定谔的猫](#)

[给好奇者的暗黑物理学](#)

[给忙碌青少年讲粒子物理：揭开万物存在的奥秘](#)

未讀



北京市科学技术委员会
科普专项经费资助

“中科院物理所”
趣味科普专栏

[第1辑]



你的“私人趣味物理导师”

1分钟 GET 1个知识点



专门回答“老师不教、爸妈不会、不问憋得慌”的物理问题

中国“十大科普自媒体”之一
65万物理粉的专属平台

“中科院物理所”官方公众号
超人气科普专栏首次结集出版

张双南 曹则贤 苟利军 王雪纯
赞赏推荐



版权信息

1分钟物理

作者： 中科院物理所

出品方： 未读·探索家

出版社： 北京联合出版公司

目 录

[版权信息](#)

[推荐序](#)

[生活篇](#)

[脑洞篇](#)

[学习篇](#)

[宇宙篇](#)

[量子篇](#)

[致 谢](#)

[编委会](#)

[返回总目录](#)

推荐序

好奇是人类的天性，也是科学发现的原动力。各位读者朋友，你们可曾对大自然的现象产生过好奇？比如：浪花为什么是白色的？闪电为什么总是弯弯曲曲的？用手机拍摄电视屏幕为什么会有黑色条纹？……幼时的我们不会想到，一些看似普通的问题其实是我们接触物理学的起点。随着年龄的增长、知识面的拓宽，有些简单的问题很容易解答；但有时候又会衍生出更多更新奇的问题或想法，总也得不到令人满意的答案。随着技术的进步，我们接触到的现象越来越多，其中涉及的科学知识越来越广，新事物出现的速度越来越快，科普工作者必须探索更新更有效的手段来满足和进一步启发大家的好奇心。

2016年4月，中科院物理所几位年轻的科研工作者在物理所微信公众号上创办了“问答”专栏。专栏一经创办，就引起粉丝们的强烈反响，掀起了一股向物理所公众号提问的热潮。专栏收到很多非常有趣的问题，而参与答题的人也从物理所的几位师生，扩展到兄弟院所和其他高等院校的研究人员。很快，“问答”成了众多粉丝每周期待的栏目。“问答”专栏到现在已经持续了一百多期，而本书的内容正是取自该专栏的精华，读者们的问题分别归纳为生活篇、脑洞篇、学习篇、宇宙篇和量子篇五个部分。有的问题很简单，但背后却蕴藏着深刻的物理知识；有的问题角度新奇，阅读答案的过程就像坐上了一辆科学的趣味列车。在这里，有些问题会有确定的答案；有些问题却只能在“答案”的引导下让人产生进一步的想象空间；有些问题甚至连科学家还没有定论。

正如书名《1分钟物理》所言，书中的大部分问题与答案可能只需要一两分钟就可以读完，读者在碎片化的时间中可以汲取科学的养分。然而，在惊叹物理学有多奇妙的同时，我们必须记住，仅仅一两分钟的时间很难彻底搞清楚一个物理问题，答案的提供者也无法确保所有的回答面面俱到。好的问题是一次探索的起点，但好的解答往往并不是探索的终点。这里的回答更像是一把钥匙，帮你开启一扇好奇之门，门内更广阔、更丰富的物理世界，需要读者自己去发掘。希望这本书中的问题和答案可以让你对物理学多一点兴趣，对生活和大自然多一些好奇。

科学知识是人类共同的财富，探求未知，并与更多的人共享，是科研人员的强烈愿望。物理所微信公众号的红火，依靠的是一批铁杆粉丝，其骨干是一批活跃在科学前沿的青年研究人员和充满活力的研究生，他们的激情是“问答”专栏的坚强支撑。专栏的创立和进一步提升是“大众科普”的最新尝试，它不仅传播科学知识，更着力于培育科学文化：好奇是求知的动力，质疑是创新的起点。我非常赞赏年轻同事和同学的激情和付出，热忱向读者朋友推荐这本非比寻常、大开脑洞的优秀读物。

愿“专栏”越办越好！期待《1分钟物理》第二辑早日和读者见面！

于渌

2019年1月于北京

（序言作者系理论物理学家、中国科学院院士）

生活篇

01.为什么晚上看路灯时会看到光“芒”（就是往外发散的那种线条）？

人眼能看见光芒的主要原因有两个。

第一个原因关乎衍射，这是任何光学系统都无法避免的问题。利用基尔霍夫衍射公式，我们可以较为精确地计算出不同形状光圈所产生的衍射图案，即光芒线的条数和延伸长度。拍摄很远处的物体时，入射光近似于平行光，对光圈做二维傅里叶变换可以近似得到衍射图案。

当然，要拍出光芒，你并不需要懂得这些复杂的数学。定性来看，光源越亮，光圈越小，由衍射造成的光芒现象也会越明显。

对人眼来说，这里的光圈可以替换成瞳孔。正常情况下瞳孔是圆形的，理论上不应该看见光芒，而应该看见“光晕”。不过，由于眼球或眼镜片表面不洁净，这种不对称的衍射现象仍有可能发生。

我们可以做个实验：在相机镜头前粘上几根头发丝，看看能照出什么现象来。



02.和金属做的碗相比，为什么塑料碗比较容易积聚油渍呢？

高中化学课会讲“相似相溶原理”——极性分子和金属离子较易溶于极性溶剂，而非极性分子较易溶于非极性溶剂，即极性相似的分子间一般亲和力更强。这里也有类似的原因。

绝大多数油脂都是非极性分子或弱极性分子，而生活中常见的大多数塑料（聚乙烯、聚丙烯、聚酯等有机高分子材料）亦是如此。因此，油脂和塑料之间的相互作用较强，而与金属材料的相互作用较弱，油脂更容易附在塑料表面。许多陶瓷材料以离子晶体为主，一般来说也会体现一定的极性，因此不容易粘上油脂且易于清洗。此外，某些塑料分子上会有一些易于和油脂亲和的基团，这些基团也会起到一定的“粘”油的作用。

综上所述，一般情况下塑料会更粘油。当然也有例外，比如，聚全氟烯烃等塑料不易“粘”任何东西。



03.人体的安全电压是36V。为什么没听说过有安全电流呢？到底是电压危险还是电流危险？

考虑到人体的情况，高电压不一定会杀掉你，但是强电流一定会杀掉你，而低电压一定不会在人体产生强电流，所以低电压一定是安全的。（哇……真像绕口令。）

那为什么不直接写安全电流呢？因为电网的标准里只有电压是恒定不变的，这样有利于电网中的负载正常运转，而电流是随电网中的

负载随时变化的。所以综上所述：第一，安全电压不是保障安全的直接原因，却是安全的充分条件；第二，设置安全电压在可操作性上比设置安全电流强得多。



04.下雨时是部分地区下雨，那为什么我们平时看不见或者接触不到下雨与不下雨的交界处？

其实下雨的地方和不下雨的地方是有比较明显的分界的，物理君在开阔的荒野中就经常看到。只是一些原因让我们不太方便看到这个现象。

首先，云层距离地面几百到几千米不等，非常高，雨滴在下落过程中会因为受到风的扰动而随机散开，导致边界模糊；其次，边界区域相对于云朵整体面积而言，占比较小，观察者不容易碰巧处在边界附近；最后，云朵在风力作用下移动，速度可轻松达到几十米每秒，边界快速移动，对观察者而言也是一晃而过。

总之，当天气晴朗、土地干燥时，如果突然遇到阵雨且雨滴较重、风速较小，我们很容易看到云朵下雨区域的干湿交界。这也符合日常生活的经验。



05.为什么自行车车胎充气后骑着轻，没气时骑着重？

理想情况下，自行车在公路上行驶不需要外力驱动。实际情况下，理想的条件不能被满足。当自行车胎没气时，行驶过程中车胎一直处在压扁——释放——压扁——释放的状态，这个过程使大量的机械能转化成内能，能量利用率降低，所以自行车骑起来会变重。

有人可能会问：为什么不直接去掉车胎？答案很简单，首先，如果去掉车胎，轮毂和地面就形成刚性接触，受力非常不均匀，容易造成轮毂损伤。其次，骑车的人会觉得颠簸很厉害，骑行体验不好。最后，轮胎可以增加车轮和地面的摩擦力，减少打滑。



06.为什么流动的水不易结冰？

这个和结晶过程需要水分子在凝结核周围有序地聚集有关。静水在达到冰点时，如果水中存在凝结核，水就会慢慢在凝结核周围结晶成冰，凝结过程正是从这些凝结核开始扩散到整个水存在的区域的。但是如果水流动起来，造成的扰动就会对水分子在凝结核周围的有序聚集起到一定的破坏作用，从而使得冰冻过程变得困难。

比较有意思的是，水在缺少凝结核的时候会形成过冷水（低于冰点却不冰冻的水）。与之相对应，水在缺少汽化核的情况下会形成过热水（高于沸点却不沸腾的水）。



07.网传冰糖的摩擦荧光是真的吗？如果是，还有哪些晶体存在摩擦荧光？

冰糖是真的有摩擦荧光。

想见证奇迹的朋友可以做一个小实验：找一个透明的、内部干燥（一定要干燥，越干燥现象越明显）的矿泉水瓶，用其1/4的容量装大块冰糖。在一个月黑风高的夜晚，拉上窗帘，关上灯，让室内伸手不见五指，然后迅速地摇晃塑料瓶，这时你就会看到瓶中的冰糖一下下地发出蓝紫色的闪光。摇得越快，现象越明显！

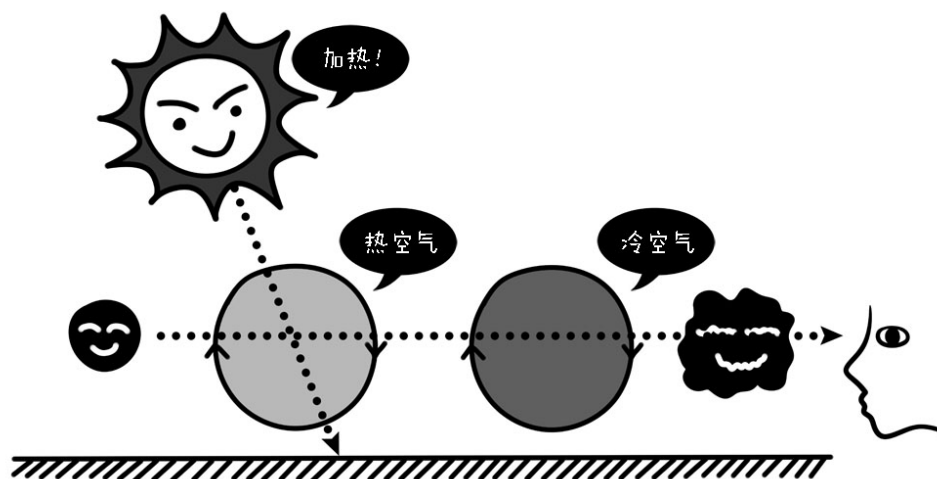
你可能不知道，摩擦荧光（Triboluminescence）的研究历史已经有几百年了，早在17世纪就有人发现摩擦糖块会发出亮光。其机理在大卫·哈里德（David Halliday）的《基础物理学》（*Fundamentals of Physics*）里面有所叙述。由于冰糖晶体的非对称性，冰糖在断裂过程中断面会带上正负电荷，这相当于把振动摩擦的机械能转化为了电势能。而电荷中和的放电过程激发了空气中的氮分子，将能量以荧光形式放出。能以相似机理摩擦发光的晶体还有LiF、NaCl、SiC等。

虽然多种晶体都有相似的发光现象，但是这背后蕴含的机理问题很多。比如，晶体的压电效应、扭曲和位错都能引起发光；还有些晶体不像冰糖这样靠激发氮分子来发光，而是因晶体本身被激发而发光。摩擦荧光也不限于非对称晶体，在某些对称晶体上也能观察到该现象。这些问题都有待人们去研究。这么看来，一个不起眼的小现象说不定蕴含着很多大学问呢！



08.夏天，地面附近会有类似火焰一样的透明的跳动。这是为什么？

太阳光透过空气加热地面。→地面通过热传导加热紧挨着地面的空气。→空气受热膨胀，体积增加、密度变小。→密度变小之后，空气开始上浮，并与上方的冷空气不断碰撞。→空中形成了很多不同密度空气的交界面，这些交界面随着冷热空气的碰撞不断改变。→不同密度的空气有不同的折射率，光线穿过交界面时发生折射。→于是，你就看到了像火焰一样透明的跳动。



09.为什么会有风？

因为有太阳。

太阳光加热了地球表面，地球表面加热了空气。这里有个关键点：地球表面不一定是同质的。比如，海水比热容比陆地大，所以陆地在同样的日照情况下升温比海洋快，这就使陆地上方的空气比海洋上方的空气更热。我们刚刚说了，热空气要往上运动，它们走了之后在地面留下一个低气压区域。虽然海洋上方的空气也在往上运动并制造低气压，但它们没有那么热，所以上升得不如陆地上方的空气快。相对于地面来说，它们处在高压区域。于是气体从高压区域流向低压区域，海风就从海洋吹向陆地了。而到了晚上，陆地迅速降温，这时海洋表面比陆地热，风又会从陆地吹向海洋了。

本质上讲，风就是太阳光驱动的热对流现象。



10.我该如何说服长辈手机电磁辐射是基本无害的？

从物理的角度来说，手机辐射是非电离辐射，而且功率很小，不会破坏有机分子，也不会对人体造成伤害。

从医学实验的角度来说，没有显著证据证明手机辐射与生理性疾病存在因果关系。

就说是物理君说的。



11.电磁炉的波对人有危害吗？请问（城市万伏变压）变压器旁边的电磁辐射对人的影响有多大？

科学未发现生活中常见的辐射来源——手机、电脑屏幕、Wi-Fi、电磁炉、微波炉、信号基站、高压变压器，等等——对人体有任何辐射伤害，只要使用者规范使用不作死。

作死举例：（1）强行打开正在运行的微波炉；（2）跑进变压器里玩捉迷藏；（3）把脸贴到正在运行的电磁炉上。

当然，这里不排除其他伤害，比如被变压器砸死什么的。

真正会带来辐射伤害的常见物品包括地铁与机场的X射线安检仪（不包括金属探测器）、烟草、医院的X光机、胸透仪、CT仪、高空宇宙射线、放射性矿物质。

当然，不谈剂量就谈毒性也是非常不科学的。目前已证明的对人体健康明显有害的辐射剂量最小值是100毫西弗。一个普通的正常人一年能承受的辐射剂量一般为2~3毫西弗。地铁安检仪泄漏的辐射剂量可忽略不计。坐飞机往返一次东京或纽约大约要承受0.2毫西弗，和一次胸透差不多。一次头部CT扫描大概1毫西弗，而与一个每天吸30支烟的人同居一年吸入的二手烟的剂量也有1毫西弗。一次胸部CT大概5毫西弗，全身CT10~20毫西弗。一个每天吸30支烟的吸烟者一年承受的辐射剂量为13~60毫西弗。

另外，放射性职业工作者一年累计全身受职业照射的上限是20毫西弗，受辐射达到200毫西弗时白血球减少，1000毫西弗时出现明显的

辐射症状（恶心、呕吐、水晶体混浊等），2000毫西弗时致死率会达到5%，3000～5000毫西弗时致死率大约是50%，10000毫西弗以上基本上就“妥妥滴”了。



12. 一个火车头为什么能拉动这么多的车厢呢？

物理君要先告诉大家一个有点反直觉的模型：在平整的刚性地面上，有一个正圆、刚性、质量均匀的轮子在无滑动滚动，即便不给轮子施加外力，它仍然可以一直维持匀速直线运动状态，直到永远。

由此可见，理想情况下，维持一辆车的运动并不需要额外施力（此处不考虑内部摩擦）。当然，对于实际情况，我们所设置的一系列条件（刚性、平整、正圆等）都不能完全满足，但是因为轮子的存在，维持火车的运动并不会“特别难”。再不济，我们还可以增加牵引车头或者使用更重的牵引车头。

事实上，火车头拉动车厢最难的阶段是在启动的时候，让车厢从静止状态转变到运动状态要比维持运动难得多。不过，启动时所有车厢并不是同时启动的，而是车头带动第一节车厢，然后车头和第一节车厢共同带动第二节车厢，直到最后一节车厢被带动，这样就完成了整车的启动，这种“逐个击破”的手段保证了较轻的车头也能拉动较重的车厢。



13.为什么硬的东西都是脆的？

这个问题好有趣。要回答也不难，我们要先定义一下什么叫“硬”，什么又叫“脆”。所谓“硬”，就是抵抗压强导致的形变的能力。所谓“脆”，就是忍受形变的能力很小，延展性差，稍有形变就会遭到破坏。

不过需要说明的是，这个问题本身并不普遍成立。比如，钢铁硬而韧，石墨软却脆。这里只针对成立的情况做一些说明。

为了说得更清楚，我们先列举几个硬东西：金刚石、大理石、蓝宝石、水晶、玻璃。我们再列举几个延展性好的软东西：橡皮筋、塑料袋、你的脸。

不知道你注意到没有，这两类东西最大的区别在于，硬的东西都是直接通过原子的共价化学键相连的（注意，玻璃不是晶体，但其内部也是通过共价键相连的，只是没有周期结构而已），而软的东西都通过氢键和分子间力拴在一起。

这样问题就很简单了，共价键的强度远大于氢键和分子间力，因此共价键很难被拉开，分子间力却很容易被破除。在产生相同的形变时，以共价键相连的物体需要更多的功，于是表现得“硬”。但共价键本质上是原子外层电子波函数的叠加，所以作用范围非常小，跟原子的尺度是一样的。也就是说，共价键稍微被拉远一些就无法继续保存了。而分子间力不要求波函数直接叠加，所以作用范围大得多（比如橡皮筋中的分子间力主要依靠熵增）。于是，硬的东西往往比软的东西“脆”。

注意，我在这里回避了金属键的软硬问题，因为金属的软硬分析比较复杂，要分析具体的晶体结构，要分析位错的生长，以及具体的杂质带来的位错钉扎。

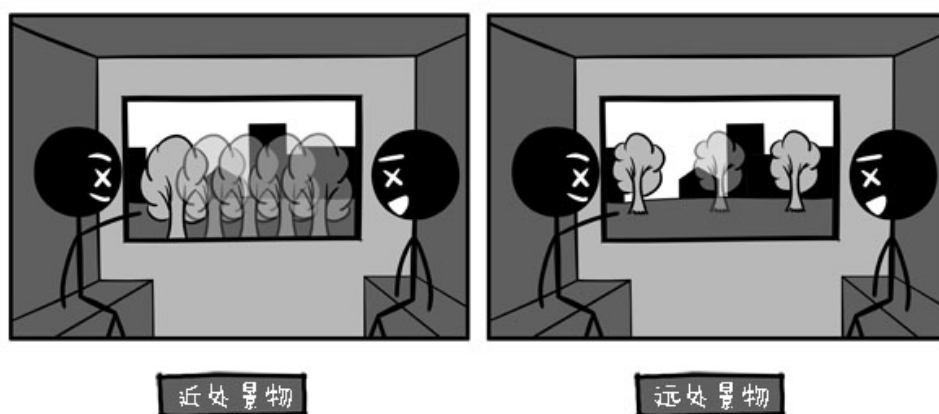


14.坐在火车上透过玻璃往外看，离得越近的东西“走”得越快（比如铁轨和路杆），而远的东西（比如建筑和树）好像就“走”得比较慢。这是为什么？

因为它们“走”过你视野的快慢不同。

所有这些静止的物体相对于你的速度都是一样的，此其一。你的视野范围大致在一个圆锥里面，距离越远（越接近圆锥的“大头”），你能看到的范围就越大，此其二。

假设火车的速度是10米/秒，对于离你只有2米远的景物，你的视野是一个半径几米的圆，所以2米远处的路杆可以在1秒内从你的视野中出现又消失；而对于离你1000米的景物来说，你的视野是一个半径数千米的大圆，于是这棵树会优哉游哉地在你眼中待上好几分钟。



15.1秒有多长？1秒的定义很复杂吗？

在历史上，1秒曾经的定义是地球自转一圈的 $\frac{1}{24}$ 的 $\frac{1}{3600}$ 。后来，随着生产和研究的发展，我们需要越来越精确的时间度量。地球自转一圈的时间并不是很精确，它是会上下浮动的。地球12月底自转一圈的时间比春分、秋分时长了几十秒。那我们到底该用哪一天的自转来定义秒呢？

所以，我们把1秒的定义改成了铯133原子基态在0K时的两个超精细能级跃迁对应辐射的9192631770个周期的持续时间。这个时间间隔非常非常精确，而且在全宇宙都是一样的。之所以用9192631770这么奇葩的次数，是为了和历史上秒的定义时长尽量吻合。在2018年召开的国际计量大会上，千克也由普朗克常数重新定义，定义比秒复杂

得多，但是对于科学家来说，这些定义更加精确，能更好地为科研服务。



16.下雨时打电话真的会引来闪电吗？

闪电产生的原因是云层和大地之间的强电压电离了空气，产生了放电通道。手机电磁辐射的能量跟这个相比是可以忽略不计的，所以手机辐射不会对闪电的放电通路造成什么影响。

另外，有人觉得电话的尖端放电效应会引来闪电，这个也是经不起推敲的。正常人在使用手机时手机的高度都不会超过身高，现在的手机外壳也没有什么尖锐的部件，所以手机也没有引来闪电的额外尖端效应。（唯一的尖端效应恐怕来自你自己的身高。）

我们的结论是，下雨天打电话会引来闪电是一个比较常见的谣言。

其实这个谣言这么流行的原因物理君想过，可能有两点。

第一，最早的手机，也就是大哥大，有很长的外置金属天线。这根天线在打电话的时候还要拉开，这个可能真的有尖端效应，会引来闪电。所以，早期的手机厂商会提示消费者，下雨天在户外最好不要打电话。很多人虽然不明就里，但记住了这一点，直到今天还记着。可是如今的手机早已今非昔比。

第二，谣言的传播是有模式的。广为流传的谣言一定有一个特点，就是谣言的接受成本远远小于其分辨成本。（哦？下雨天打电话引雷？那我不打就好了，难道还要我专门去学一下电磁学吗？大家都很忙的。）如果商家说“家里面钱太多会引来闪电”，那我敢说这个谣言肯定流行不起来，因为不管真懂还是假懂，所有人下意识地都想反驳它。接受成本太高啦。

所以，辟谣不光是一个知识量的问题，它更是一个成本与行为模式的经济学问题。要真正消灭谣言，第一要提高谣言的接受成本，第二要降低谣言的分辨成本。



17.开发商总说楼层中间地带是扬灰层，那么灰尘在空气中能够达到的高度有多高？

灰尘在空气中达到的高度受到很多因素的影响（风速、风向、气温、湿度），而且不同尺寸、不同电荷、不同pH的灰尘能达到的高度也是不一样的。这里并没有一个简单通用的公式。但至少，某些楼层（比如经常被提起的9~11层）是扬灰层这个说法是谣言，因为每一个地方情况都不一样，同一个地方不同的灰尘可能在不同层聚集，也可能在所有层都差不多。



18.为什么纸张沾了油会变透明？

这个问题很好呀！

纸张是一种充满了孔隙的杂乱纤维，孔隙中有很多空气，而空气和纤维的折射率不同。于是，当光线照到纸上的时候，一部分会被纸张纤维吸收，一部分在纸张的孔隙中不断散射，在杂乱的纤维与空气界面发生杂乱的折射和反射。

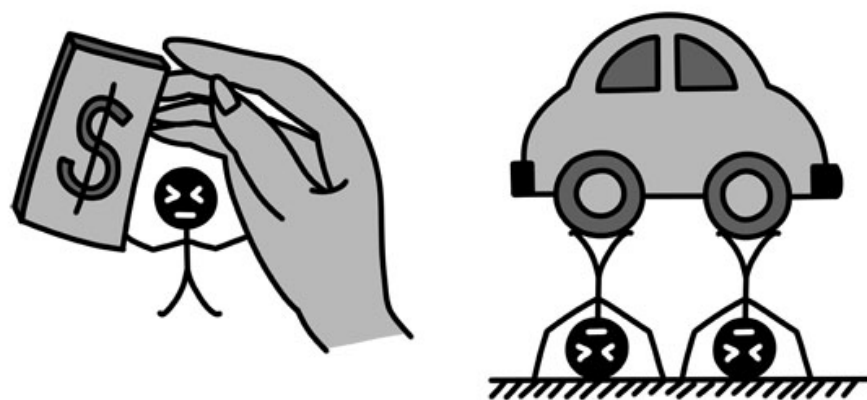
油（植物油）和纤维的折射率差别不大，分别接近1.47和1.53（空气折射率是1.0）。如果孔隙中充满了油，那么油和纤维的界面上的折射和反射就大大减少了，光线差不多可以直射过纸张，纸张就变得透明了。

其实你们还可以观察到这一点：纸张浸水之后也会变得透明，但又不如浸油后透明度高。为什么呢？答案很简单，因为纯水的折射率大约是1.33。



19.路面有水，水会减少汽车轮胎与路面的摩擦力，引发打滑现象。但是，人工清点纸币时，干燥的手指在纸币上却打滑，将手指沾水后反倒不打滑了。这是为什么？

两种现象的主要差别在于水层的厚度。水层是不是足够厚，可以让水自由地在层间流动？如果是，那水自然就会打滑。如果不是，比如只在手指上、玻璃上涂了很薄的一层水膜，那这时表面浸润和张力会让水增大摩擦。



20.在电梯里手机为什么没信号？

因为电梯把电磁信号屏蔽了。

大家都学过中学物理中的静电屏蔽效应，即导体空腔内外的电荷分布不会互相影响，因为导体中的自由电荷会随着导体内外的电荷产生的电场而做出“调整”，达到“屏蔽”的效果。

电梯中的信号问题与这有些类似，电梯可看作一个封闭的导体空腔，由于自由电荷的影响，电磁波不容易穿过导体。在手机信号的频率波段下，电磁波在导体中的穿透距离很小，强度衰减得很快。因此，手机发出的信号很难传到电梯外，电梯外的电磁信号也难以传到手机上。



21.关于乐器的声音，音调、响度有确定的物理量去分析，那么如何定量分析“音色”？

音色的类型是由振源的特性和共振峰的形状共同决定的。

首先，你需要了解不同乐器的音色为什么不同，以及“泛音”是什么。乐器的声音并不是由单一成分的频率构成的，而是由一组满足倍数关系的频率构成的。所有乐器都靠驻波发声——因为琴弦的两端被固定住了，所以琴弦振动部分的长度必然是半波长的整数倍。我们知道频率等于波速除以波长，当我们拨动琴弦时，也许有80%的能量被转换为整个琴弦的振动，产生了基音，同时会有10%的能量被转换为2倍频的振动，5%的能量被转换为3倍频，而2倍频的成分从某种意义上讲也可以是基音，又可以转换为4倍、8倍的成分……每种乐器的能量分配比例都不同，于是每种乐器都是独一无二的存在，拥有独一无二的音色。



22.请问，孕妇防辐射服有必要穿吗？

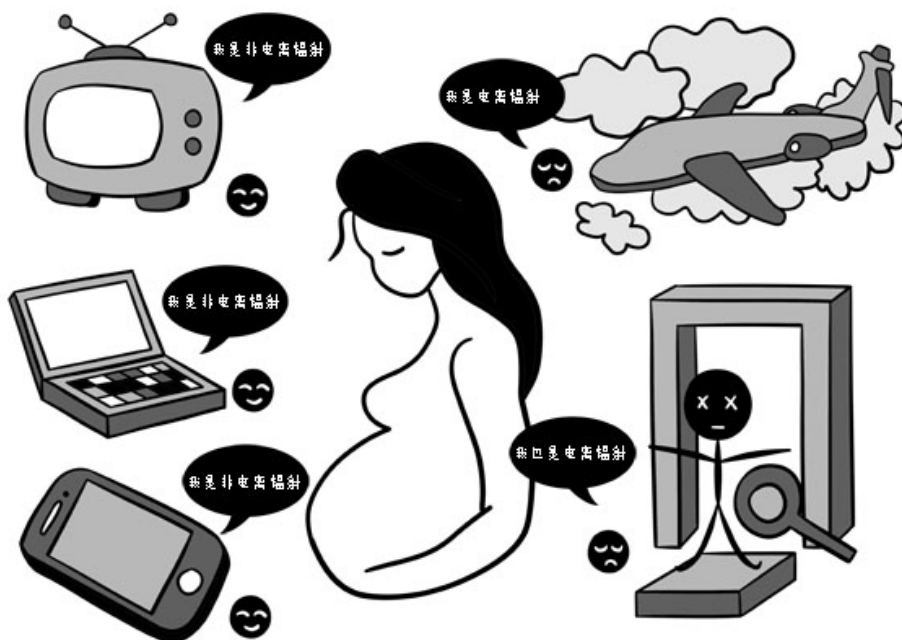
完全没有必要。

可能有很多人会出于各种目的向您及您的家人鼓吹穿孕妇防辐射服的必要性。但我们要说，完全没有必要。

首先，只有电离辐射对人体有害。电视电脑也好，手机微波炉信号塔也好，这些日常生活中的辐射都是非电离辐射，而非电离辐射对人体是无害的。（你只需要注意别被微波炉烤熟就行了。）

再则，常见的电离辐射有安检时的X射线辐射，坐飞机时的高空宇宙射线辐射。但这些辐射我们接触的剂量很小，是可以忽略不计的。

最后，如果您不幸生活在福岛，那么那么薄的孕妇防辐射服，第一防不住 γ 射线，第二防不住 β 射线，唯一能防的也就是 α 粒子。但 α 粒子您的皮肤也能防。现在很多所谓的防辐射孕妇服在衣服里面加金属丝，思路还是用感应原理隔绝非电离辐射。这又回到第一点了，也即非电离辐射是无害的。



（PS：市场上连防引力波辐射孕妇服都有了。如果这东西真能吸收引力波，那我们科学院要先买一打呀，因为这货挂起来就是引力波探测器，岂不美哉？）

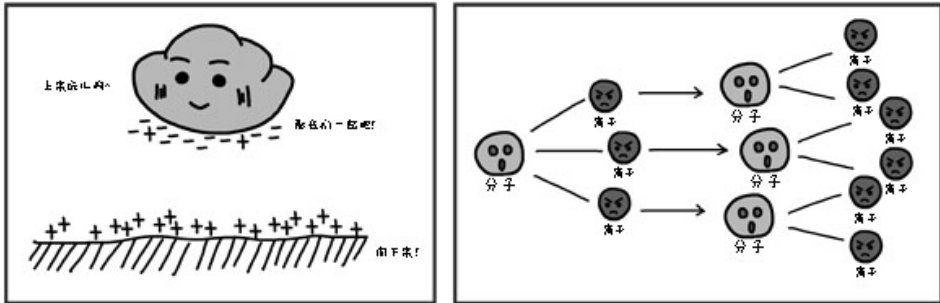


23.雷电是怎么产生的?

雷雨的积雨云下层以及地表富集着大量的相反电荷，这使得云和大地之间形成了非常大的电势差（几十兆伏），这样高的电压产生的电场有可能让空气分子电离。电离出来的离子在电场加速下高速撞向旁边的分子，把旁边的分子也给撞电离了。然后，这种雪崩一样的情况把空气沿着一条线变成了导体，电荷通过这条线迅速放电，就形成了闪电。放电产生的热量把空气加热，使得空气膨胀摩擦并发出声响，这就产生了雷。

雷雨云中为什么会富集如此大的电荷量？目前有很多理论，但是每个理论都不能解释所有的现象，雷雨云的起电机制现在还是一个有争议的问题。

想了解更多朋友可以去看看《费曼物理学讲义》的第二卷，书中有更加易懂的讲解。



24. 北极的冰屋里真的不冷吗？

冰屋确实能起到很好的御寒作用。

冰屋几乎没有缝隙可以让寒风吹进室内，而且冰屋的建成材料冰砖是热的不良导体，能起到很好的隔热作用。冰屋门的朝向一般与风向垂直，而且十分低矮，寒风无法进入室内形成对流。

北极的室外温度低至零下几十摄氏度，而冰屋内的温度可以达到零下几摄氏度到十几摄氏度，这对于有兽皮保暖的因纽特人来讲已经足够了，普通人应该也没什么太大问题，毕竟冬天我国南方室内不开空调跟这个温度应该差不太多。室内一般也不会出现冰块融化的问题，因为冰壁附近的温度总是低于熔点的，如果能让室内更暖和，因纽特人会在内壁挂上兽皮，这样尽管室内很暖和，但兽皮和冰壁之间的空气因兽皮隔热而无法升到较高的温度。雪洞保暖也基于同样的原理，若是条件合适，挖雪洞避寒也是很好的野外生存技巧。



25. 液态氧和固态氧为什么是蓝色的呢？

考虑氧的颜色就要考虑氧分子的吸收光谱。氧气的吸收光谱主要存在于红外区域，气态的氧便呈现无色透明的状态。但是在液态和固态中，由于凝聚态的双分子耦合作用，产生了红到黄绿光区域的四个吸收峰，所以液态氧和固态氧显示蓝色。

另外一个原因是气态的氧分子在空间分布的密度很低，所以即使吸收同样颜色的光，颜色也太浅，肉眼根本看不出来。

参考文献：

E.A.Ogryzlo J. Chem. Educ.,1965,42(12),p647

Ahsan U.Khan,Michael Kasha J.Am.Chem.Soc.,1970,92(11),pp3293–3300



26.为什么燃烧后的火柴具有磁性，可以被磁铁吸引？

这和燃烧没有关系，没有点燃的火柴头也会被磁铁吸引。

把火柴头放到水里，旁边放上磁铁，火柴头会因受到吸引而运动。显然，火柴头里加入了磁性物质，考虑成本问题，铁粉的可能性最大。那么为什么燃烧后现象变明显了呢？从分析来看，有下面两个原因：第一，火柴燃烧后大部分可燃物被氧化，火柴更轻了；第二，磁性粉末分布更加集中，磁化效果更强。

为什么火柴头里要加入磁性粉末呢？细心的朋友会发现，火柴一般都是头朝一边躺在火柴盒里的。没错，加入铁粉后，我们用磁铁吸一下就可以高效地把火柴头顺到一边了。我国早在20世纪80年代就拟定了技术标准，颠倒头的火柴是不允许装盒的。传统的方法依靠火柴头尾重量差，用振动实现顺头。这种方法一是分离不完全，二是容易失火，安全性差，三是会出现大量的残余，造成浪费。所以，现在大

家都采用掺磁性粉末的方法解决这个问题，这个点子还在1991年的时候申请了国家专利呢！



27.为什么飞机飞过天空后会留下云？

云的形成过程大致是这样的：大气中的水汽过于饱和，不断聚集在凝结核上，形成了小水滴或者小冰晶，然后这些水滴或者冰晶会反射和散射太阳光，我们就可以看到云了。

飞机飞过留下的云可以称作“飞机尾迹”，我们经常看到的是喷气式飞机的尾迹。喷气式飞机在高空飞行时会排出大量含有水蒸气的高温废气，而机舱外的环境温度通常是零下几十摄氏度。高温废气与空气混合，温度下降，水蒸气达到过饱和的条件，在凝结核上凝结成小水滴或者小冰晶，于是就形成云了。尾迹一旦形成，一般可以维持30～40分钟。



28.北半球的水涡都是向左旋转的吗？听说这是由地球自转和不同纬度的不同线速度决定的，这种解释科学吗？

地球自转的确会产生一种改变运动方向的力，这被称作科里奥利力（或者地理学中的地转偏向力），但这种力的来源不是各处不同的线速度。关键在于，地球是一个转动的非惯性系，而且只有相对地球

运动的物体才会受到科里奥利力。北半球的气旋逆时针旋转（左旋），南半球的顺时针旋转（右旋），这的确是因为科里奥利力。

但是，如果你指的是洗手池、浴缸、抽水马桶等在放水时形成的水涡，那么它们的旋转方向与科里奥利力无关。这是因为这些东西排水时涉及的尺度与速度太小，科里奥利力太小，不足以影响水流方向。水涡的旋转方向主要由排水孔内部的结构决定。

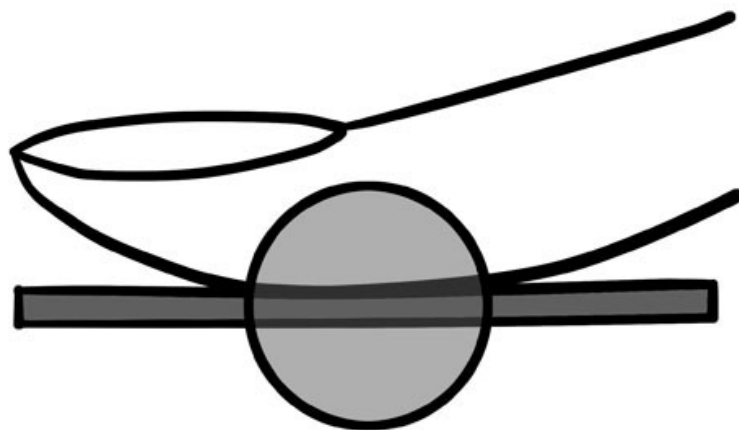


29.为什么用纸或塑料遮住手机Home键，指纹识别依然可以使用？难道这样也导电吗？

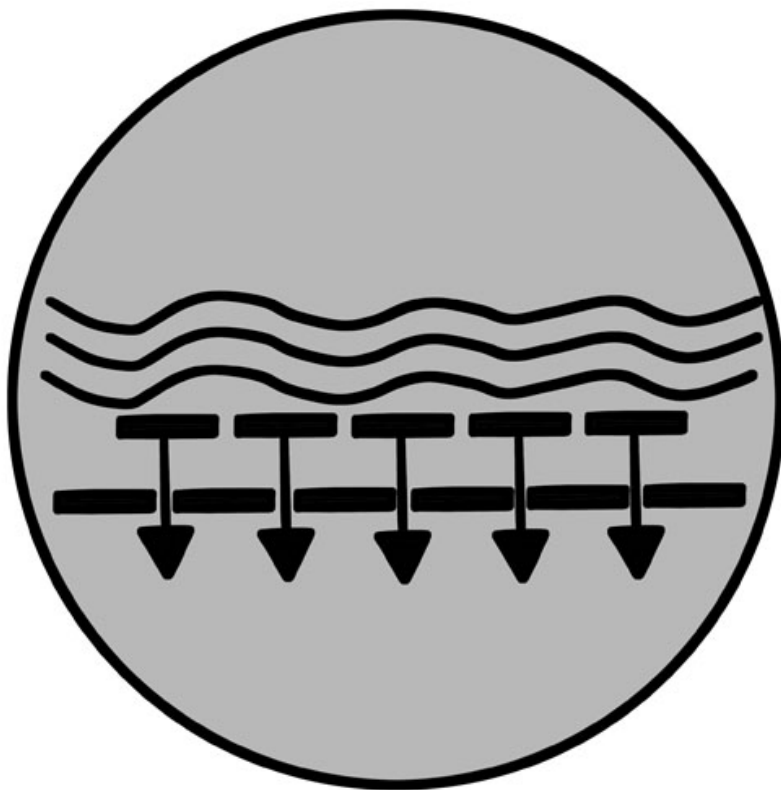
所谓指纹识别，即通过识别模块收集你的指纹信息，与之前存储在手机中的指纹信息进行对比。根据收集指纹的方式不同，指纹识别模块主要分为这几种：光学式指纹模块、电容式指纹模块、射频式指纹模块。

光学式指纹模块利用光学反射成像识别指纹，但其识别精度并不理想，且占用空间较大，所以手机上很少用这种识别模块。

电容式指纹模块利用硅晶元与手指导电的皮下组织液构成一个“电容器”。我们知道，两个电极之间的距离远近会影响电容器的电压；根据这个原理，指纹的高低起伏会在不同的硅晶元上形成不同的电场，这样就把指纹信息转化成了电信号。目前大多数手机的指纹识别使用的都是电容式指纹模块。



射频式指纹模块有无线电波探测型和超声波探测型两种，原理是靠特定频率的信号反射探测指纹的具体形态。这种技术通过传感器本身发射出微量射频信号，穿透手指的表层，探测里层的纹路。其优点是手指不需要和识别模块接触。



了解这些之后，我想你已经知道问题的答案了。首先，你的手机指纹识别模块是电容式的，对于这种模式的指纹识别，只要“中间介质”没有厚到让产生的电场太弱而检测不到，那就不会影响指纹识别。你可以做个小实验，看加多少张纸后，指纹识别功能才会失效。

“湿手无法指纹识别”的现象也很容易理解：水有导电性，这时模块识别的是水的“纹路”，而不是你手指的。



30.为什么导电的固体大多不透明，而透明的固体大多不导电？

透明的含义是什么？

从能量的角度讲，透明意味着材料中的电子无法吸收可见光所对应的能量并进行跃迁。可见光红紫两侧对应的能量分别约为 1.6eV 和 3.1eV 。固体中的原子常常整齐地排列形成晶体，其中的电子会处在一系列准连续的能级上，这被称为能带。以金属为代表的导电固体之所以呈现金属性，是由于其中的电子填充了半满的能带，电子只需吸收很少的能量即可跃迁到与之最近的能级上。当然，电子也可以吸收更多的能量跃迁到更高的能级上，而这些能级对应的能带范围连续且很宽，经常在整个可见光范围内都有吸收，因此就不透明了。

不导电固体，以水晶为例，其电子填充了整个能带，能带与能带之间隔着一定的能量，这就是带隙。这意味着电子吸收的能量至少需要接近带隙对应的能量才能发生跃迁。水晶的带隙较大，约为 9eV ，远远超过可见光能量，其电子无法通过吸收可见光跃迁，于是水晶表现出了透明的性质。

半导体与绝缘体相似，但是带隙比绝缘体小，具体情况需要具体讨论。比如，Si带隙对应 1.1eV ，小于红光能量，整个可见光段在此都有吸收，故不透明；而SiC带隙对应 2.4eV ， $2.4\sim 3.1\text{eV}$ 范围的可见光在此被吸收。绿光能量为 2.37eV ，这意味着红橙黄绿蓝靛紫的全谱中，蓝靛紫在此被吸收了，红橙黄绿依然透过，材料依然透明，但会显示颜色。至于塑料等以分子为主的材料，分析方法与之类似，只是这种材料未形成能带，而是有一系列分立的能级，需要根据具体情况分开讨论。

这个问题还可以从另一个不严谨但是更直观的角度理解：导电说明电子可随电场自由移动，当然也可以随光的电磁场运动，从而吸收

光的能量，表现为不透明；而透明物体对光无明显吸收，说明其中的电子不易随光的电磁场运动，那么它们在普通的电场中也不易自由移动，物体也就不导电了。



31. 物体的熔点能改变吗？

当然可以。固体怎么就熔化了呢？固体中的原子或分子因各种相互作用而手牵手整齐排列，温度相当于引入了原子或分子的振动；温度越高振动越强，振动太大、偏离平衡位置太远，原子无法继续牵手，队伍就乱掉了，固体也就熔化了。因此，一切可以影响原子或分子间相互作用的物理量，包括压强、杂质、外场、衬底，甚至颗粒尺寸都可能对熔点造成影响。

例如，冰在通常状态下熔点随压强增大而降低，所以挂着重物的钢丝勒在冰柱上很容易使冰局部熔化并缓慢嵌入。而在很高的压强（如20000个大气压）附近，冰的熔点随压强增大而升高，可超过室温，这叫作“高压热冰”。杂质的加入可以改变熔点，在冰中加入少量盐或酒精就可以降低熔点，这一原理可用于道路除雪和拖拉机水箱防冻。电场和磁场也可以改变冰的熔点。在不同的衬底上，物质的熔点也会有所差异，例如，低温下吸附在不同金属衬底上的固态氧薄膜熔点不同。另外，固体表面附近的熔点一般比体相要低，这一原理可应用于超细粉末固相烧结。纳米颗粒因表面相比比例很高，熔点可大幅降低，降幅甚至可达几十至几百摄氏度。



32.耳机降噪的原理是什么？

降噪方法分为被动降噪和主动降噪。前者指的就是普通的隔音，利用硅胶塞等在耳洞内形成封闭空间，阻挡外部噪声传入。这种方法的特点是容易滤去高频噪声，而对低频噪声过滤效果不佳。不信你可以试一试：用手指堵上耳朵，尖厉的声音明显减弱，而机器轰鸣等低沉的声音却依然明显。

不过我猜你更关心的应该是主动降噪，对此物理君只能摇摇头.....不是不知道，而是请你一起摇头。

注意：摇头的时候你还可以看清手机屏幕上的字吗？差不多可以，这说明头部转动并没有给眼睛带来太大的扰动，这是为什么呢？因为眼睛感受到视野变化的信息后，会及时传给大脑，大脑给眼睛一个反向转动的命令，抵消脑袋转动的影响，从而减少视野的晃动。主动降噪耳机的原理与之类似，麦克风接收周围的噪声，传给芯片，再让扬声器发出一个与噪声等振幅、反相位的声音，从而与原噪声相互抵消。这种方法在过滤低频噪声时效果非常好，但噪声频率太高时，可能会遇到电路延迟及波长减短带来的相位误差问题。因此，两种降噪方法合二为一时效果更佳。



33.为什么电池会有保质期呢？没用过的电池超过保质期使用起来会有什么反应？电池里的电去哪儿了？

电池当然会有保质期！

这个问题和干电池的自放电现象有关。我们先来复习一下在中学时代学过的铜锌原电池：铜做正极，锌做负极，中间连上导线，把电极浸泡到电解液中，我们就会在外电路得到电流输出。如果我们把导线去掉，让铜锌电极直接接触，并把它们完全浸泡在电解液中，会出现什么情况呢？我想你肯定知道，这和原电池没有什么不同，只不过我们没法利用由此而来的电能了。如果铜电极很小，只在锌的表面有一些分布，那就会形成无数个微小的原电池，从而消耗电池的化学能。电化学腐蚀的原理也是如此。没错，干电池的自放电就是电解液中的杂质或者电极的不均匀表面造成的。电池的正负电极都会出现微电池腐蚀的情况。但通常情况下，自放电主要发生在负极，如果电极表面存在析氢电位低的杂质，就会出现析氢反应。铁、镍、铜、砷等杂质都是有害的。所以，电池工业对电极和电解液中杂质浓度的控制相当严格，对工艺流程和生产环境的要求也很高。

电池经过较长时间的贮存后，自放电会造成杂质在电极表面沉积，电解液变质，从而出现开路电压变低，持续稳定放电时间变短等情况。电能嘛，最终都变成热能跑掉喽。

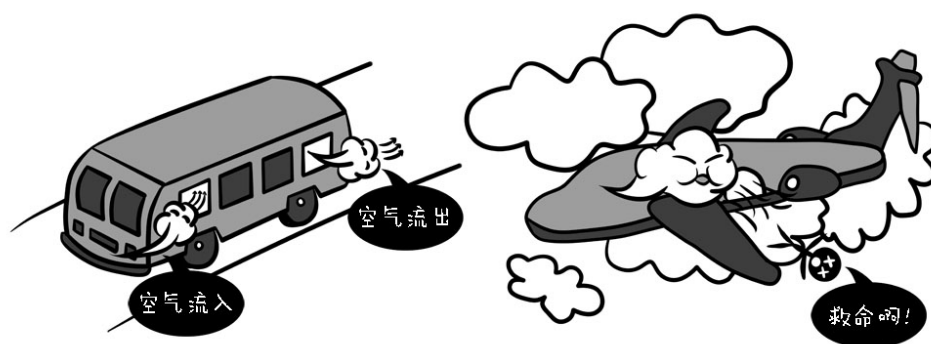


34.为什么汽车在公路上行驶时，打开窗子风会从外面吹进来，而客机在空中破口时，风会将人往外吹？

汽车在公路上行驶，车内外气压都接近一个大气压，压差主要由运动引起。实际情况会比问题中所述更复杂些。具体来讲，由于汽车

相对空气运动，前方空气被轻微挤压，压强略高，从前边车窗吹进来，或者被前挡板推向两侧；由于伯努利原理，汽车侧面存在一个低压区，部分空气向外流出并逐渐平衡，尤其是当汽车或火车快速经过隧道时，你的耳朵对此会有明显的感觉。另外，车窗周围还存在一些因相对运动而灌入的空气，以及在车窗边形成的涡流。汽车尾部也存在一个低压区，汽车行驶速度很快时甚至可形成湍流，并影响加速，这是赛车提速需要考虑的重要因素。我们很容易通过车尾扬起的尘土观察到这部分空气的运动情况。

客机飞行高度为10000米左右，此处空气压强只有标准大气压的 $\frac{1}{4}$ 到 $\frac{1}{3}$ 。你可以想象一下珠穆朗玛峰顶的低温低压环境，人在这种环境下会呼吸困难。为了保证人的生命安全和正常活动，飞机采取密闭充气的方法，保证飞机内压强在 $\frac{2}{3}$ 标准大气压以上。因此，飞机内的压强始终比外部高，且这个压差较大，不可忽略。一旦客机在空中发生破损，强大的压差就会让空气迅速涌出，形成向外吹的大风。



35.镜子的反射率与什么有关？这个量有理论上限吗？

光介质的反射率是指当入射光垂直打入介质时，其反射光强与入射光强的比值，与其对应的是光介质的透射率，根据能量守恒我们知道二者之和为1。一般光介质的反射率与透射率是通过求解光入射到介质表面的麦克斯韦方程组的边界条件得到的，其大小与介质的介电常数、磁导率，以及入射光的频率有关。不过在大多数情况下，磁导率和光波频率的影响可以忽略不计。至于镜子，我们知道，镜子一般是由镜片（一般为玻璃）和镀在镜面上的金属膜（最常见的是银）构成的。玻璃的透射率很高，而金属膜的反射率很高，光打到镜子上以后，很大一部分透过了玻璃，由金属膜反射回来，所以镜子的反射率是由玻璃的透射率和金属膜的反射率共同决定的，一般镜子的反射率都在90%左右。用途特殊的镜子，如实验室中的一些反射镜，反射率能达到95%以上，甚至99.9%，但是绝对无法达到100%。



36.当光通过水的时候，水的流速会对光线传播产生影响吗？

首先说结果，水的流速确实会对光传播造成影响，光线会被介质的运动“部分拖曳”。其实风也会把声音吹跑，“顺风而呼，声非加疾也，而闻者彰”乃是对经典情况下介质运动对声波的影响的精妙总结。光的情况稍有不同，假设光线和介质速度共线，光相对于我们的速度为 $c' = c/n + v(1 - 1/n^2)$ ，其中 c' 为经过介质时光的速度， n 为折射率， v 为介质运动速度。1851年，斐索从实验中得到了该结果。它并不是介质中的光速和介质运动速度的直接线性叠加，这是相对论修正带来的结

果。有的同学可能会问，光速不是不变的吗？但是这个结果告诉我们，“光速”不仅对于不同介质是可变的，而且对于运动速度不同的同种介质也是可变的。这是因为速度始终要符合相对论的速度叠加公式，我们不能简单地认定“光的速度是不变的”。

为了形象地说明光会被拖曳，我们在此介绍一个观察实验。一束光正入射在以一定速度流动的水的表面，如果流动没有对光传播造成影响，那么光必然会继续垂直射入水中。现在，我们到和水流相对静止的参考系中观察，这时候由于和光源相对运动引起的光行差效应，光以一定角度射入水面，而这会发生折射，使光的传播方向发生改变，这显然是不可能的。所以我们推断，光必然会被水流拖曳。如若考虑水流动过程中的不均匀因素，光的折射方向还会不断改变，当然，这是另外一回事了。



37.近视眼在水下看东西会感觉一切都很清楚。怎样从光学的角度解释这个现象呢？

我们需要先讲一下人的视觉系统是怎么“看到”东西的，光线进入人眼，经过晶状体的折射来到视网膜。视网膜上的感光细胞感受光信号，然后由视神经传递到大脑，这样我们就看到了物体的像。可以看出，晶状体在视网膜上成像的质量对于我们是否可以看清物体至关重要。近视的产生就是因为眼部调节晶状体形状的能力变弱，使得经过晶状体折射的光线过早地汇聚，落在晶状体上的像变得模糊不清，此时人眼看到的像也是模糊的。近视镜的作用就是令光在进入眼睛之前

提前发散一次，发散后的光在经过（不健康的）晶状体之后反而可以在视网膜上形成清晰的像。

我们在水下睁开眼睛时，由于水的折射率大于空气，光从水中进入眼睛产生的偏折效应比在空气中小。这就相当于对光进行了一次发散，其结果就是我们看得清楚了。当然，这只对近视眼有效果，对远视眼效果相反，大家可以自行分析其中的原因。最后，请大家思考一下：为什么大多数鱼是“近视眼”？



38.为什么电扇背面没有风？为什么对电扇说话声音会变得怪怪的？

电风扇背面也是有风的，只是相对正面而言要小很多。扇叶快速旋转，以斜面的形式给空气一个推动力，直接令空气加速，形成风从正面吹出，这个速度比较快；而风扇后方的空气，则要去填补被扇叶吹出去的那部分空气原来所在的空间，靠压差形成风，这个速度比较慢。而且，前面的风比较集中，几乎都朝一个方向吹，而后面的风则是从风扇背面各个方向过来的，比较分散，也就没有那么强了。如果你把风扇放在一个长型管道中，前后的风速差别就要小很多了。

对着电风扇说话时，声音会怪怪的。这一方面是因为前面吹的风影响了我们说话时吐出的气流的速度甚至方向，另一方面是因为以我们的口腔为共振腔，产生了一些驻波，这会发出声音。为了减少干扰，你可以试着面对风扇，嗓子不主动发声，空做类似“呜呜”的小口型和“哇哇”的大口型，听听不同的声音。这个有点类似于对着空啤酒

瓶吹气，吹的速度和方向不同、瓶口的大小和深度不同，发出的声音也不同。当然，风很大时，口型都控制不稳了，声音就更怪啦！比如，喝西北风。



39.为什么尺子和橡皮放在一起久了会粘在一起，接触的地方还会有油一样的物质？

当然是因为它们性情相近、真心相爱，而且还有“油”做媒啦！（再也无法直视这对CP了。）

其实吧，尺子所用的材料多为聚氯乙烯、聚苯乙烯、聚甲基丙烯酸甲酯等，橡皮的主体成分为聚氯乙烯等，总之都属于高分子聚合物塑料，所以性情相近嘛。而橡皮之所以拥有如此光滑柔嫩有弹性的肌肤，离不开一种特殊的物质，它被称作塑化剂或增塑剂。

你想啊，一般的高分子聚合物链很长，如果它们之间的相互作用太强，就容易纠缠在一起，阻碍长链的相互滑移，从而影响其塑性。塑化剂的主要作用就是削弱它们之间的作用力，此外还可以降低聚合物的结晶性，最终增加材料的塑性，因此塑化剂在橡皮的制作过程中必不可少。然而常用的酯类化合物塑化剂，比如酞酸酯系列，对塑料有一定的溶解作用，因此可以很好地充当“媒人”，将尺子和橡皮黏结在一起！



40. 风扇为什么逆时针旋转？

这是个很有趣的现象，应该与螺纹方向有关。工业上为了降低成本，各种零件会尽量遵循标准化的原则。常见的螺纹都是右螺旋的。因为规模效应，右螺旋的螺纹成本比左螺旋的更便宜。如果电机向外伸出的转轴末端为普通右旋螺纹，且与风扇配套，那么你很容易发现，当风扇逆时针旋转时，风扇与转轴之间的作用力趋于将两者拧得更紧；而当风扇顺时针旋转时，螺纹连接处会越来越松。虽然现在的风扇连接方式越来越多，但这种方式依然作为主流保留了下来，甚至可能成为行业规范。

工业中很多机械的设计都会考虑到螺纹松紧的这种效应，尤其是旋转和振动比较频繁的结构。有趣的是，自行车左右两个脚踏板对应的曲柄与齿轮的连接处，分别安装了左螺纹和右螺纹部件，这样可以保证两边踩踏时都不会松动。不过我也确实碰到过一辆劣质自行车，

可能是为了节约成本，或者是从一开始就有设计缺陷，总之两侧都用了右螺纹，骑了才几天脚蹬就掉了。

再给大家讲一个有趣的小知识。

其实刚开始的时候，左螺纹和右螺纹的成本和装配便捷程度可能都差不多，但是这样相应的机床、螺丝、螺母等就不能任意配对了。一旦某一个环节打破了平衡的局面，比如市场上出现了一大批右螺纹的机床或者螺母，那么相应的螺钉就需要是右螺纹的了，左螺纹的卖不出去，长此以往，市场自动调整为单一种类的螺纹以降低成本。

生物界也有类似的例子。比如蜗牛的螺壳旋转方向，原本左右都有，然而由于其生殖器官位置的关系，只有螺壳旋转方向相同的蜗牛才能方便地交配。长此以往，整个种群在这一点上就逐渐趋于统一了。这是不是也算一种对称破缺？



41.为什么纯水不导电，而普通水会导电？

导电是一定数量的载流子的定向移动产生的。常温下，水的电离全部来自水分子电离。水的离子积常数为 10^{-14} ，所以 $c[H^+]=c[OH^-]=10^{-7}$ 摩尔/升，由此可以计算得到电离度 $1.8 \times 10^{-7}\%$ 。这样的水离子浓度太小，几乎是不导电的。纯水电阻率量级为 $10M$ （欧姆·厘米）。

而普通水中含有一些杂质离子，一般是天然的 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ，以及消毒处理引入的 Cl^- 。水本身存在弱电离平衡，强电解阳离

子或者强电解阴离子都会使电离平衡重新建立，强电解质对导电也有贡献，会使水的电解率增大，这个时候普通水当然导电了。

此外，哪怕你真的拿着纯水接上高压，只要人体接触纯水，身上的盐和酸也会对纯水造成污染，那个时候导电不导电就不仅仅是水纯不纯的问题了。



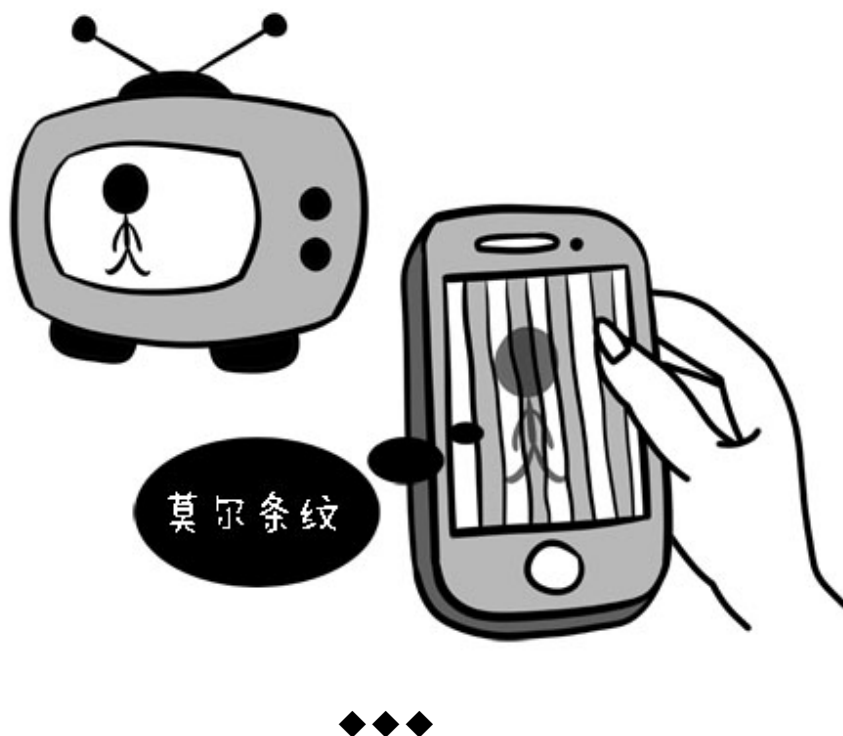
42.为什么有的时候用手机或相机拍电视中的图像会出现黑色条纹？

这就是传说中的莫尔条纹（Moiré Pattern）啦。一言以蔽之，就是空间频率相近的两组图案相互干涉，会有更低频率（更宽间距）的图案显示出来。其中空间频率是指特征条纹间距的倒数。

说得这么玄乎，其实道理很简单啦！比如，在两张透明塑料纸上分别画一排竖线，上面那张每隔1毫米画一条，下面那张每隔1.1毫米画一条，你很容易发现，竖线每隔11毫米就会重叠一次。细线重叠位置附近，露出的间隙较大，显得明亮；而细线不重叠的位置附近，露出的间隙较小，显得灰暗。这样就形成了周期为11毫米的明暗分布，整体看上去就是一排间距更大的粗条纹。

以上只是一维周期图案对应的情况。那么二维情况如何呢？我想你在生活中一定盯着两层重叠的窗纱看过吧？细心的你一定会发现，在原有细密条纹的基础上隐隐约有间距更宽的粗条纹出现。当两层窗纱不完全平行或者自身有所起伏时，这些条纹还会变得弯弯曲曲的。用摄像头拍电视屏幕时也有类似的情形：电视屏幕上纵横的像素网格相当于第一层窗纱，手机摄像头里的CCD传感器阵列相当于第二

层窗纱，手机显示屏相当于第三层窗纱，于是拍摄得到的图案也就有莫尔条纹啦。再加上角度偏离时的透视、镜头成像时的畸变，以及屏幕本身的微小形变，这样拍摄到的莫尔条纹同样是弯弯曲曲的。



43.为什么冷水冲不开咖啡？

冷水能冲开咖啡，只不过需要你持续不断地努力折腾，比如充分搅拌、大力摇晃。

我们要知道，冲泡咖啡的过程是咖啡溶解于水的过程。影响溶解的因素有很多，温度就是其中之一。一般来说，温度越高，溶解越快。这是因为温度升高，分子热运动加剧，咖啡分子更容易跑到水分子之间的空隙中，宏观上就是咖啡比较快地溶解了。冷水中的低温环

境会减缓这个过程，但它并不是不能完成。物理君强烈建议你买一包咖啡泡在矿泉水瓶里，盖上瓶盖，大力摇晃，仔细观察，细细品味。嗯，热水冲开咖啡之后不会沉淀，这个涉及溶解度的问题。溶解度是一定温度下每100克水能溶解溶质（咖啡）的克数。要想溶解后出现沉淀，则需要在溶剂达到饱和（最大溶解度）之后再加入溶质（咖啡），这样才能析出溶质（咖啡）。



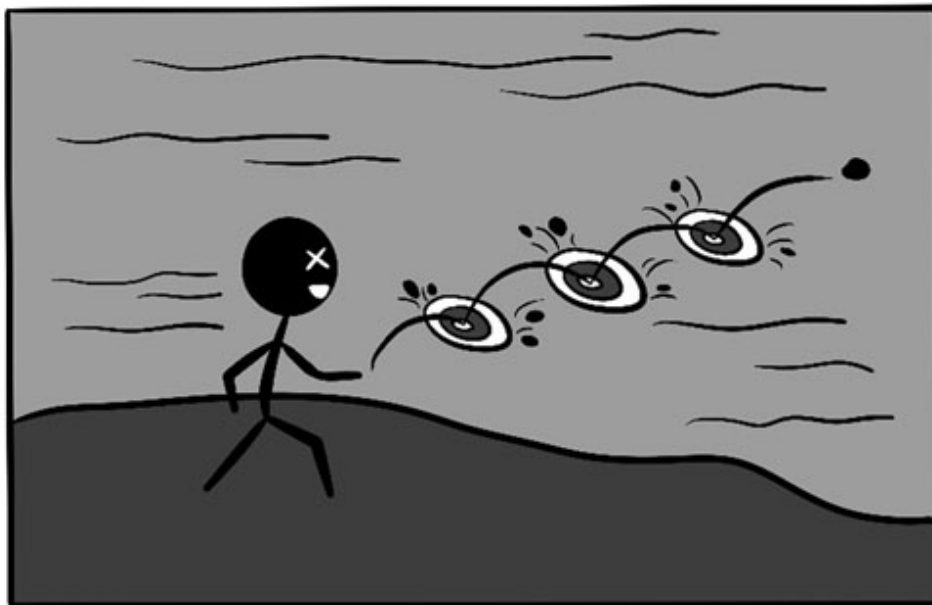
44.打水漂时，为什么石头不会立刻落进水里？

因为有水的作用力啊。

就像冲浪一样，石头片向前快速运动的过程中，水给它一个向上的分力，让它暂时不会下沉。打水漂，核心是漂，说到底，就是石头在水面一跳一跳地“冲浪”。其中主要的几个因素，一是形状，二是角度，三是速度，四是稳定性。

首先，打水漂用的石头都是扁平的，就像冲浪板一样，这保证它与水面有足够大的接触面积，以便充分接受水的托力。

其次，抛出去的扁平石头片还需要与水面呈一定的倾角，称为“攻角”，就像冲浪板前端轻微翘起形成的角度，这样它向前运动时，水面就会给它一个向上的分力。攻角在 20° 左右为宜。攻角太小时，竖直方向上的分力不够，难以起跳；攻角太大时，水平方向上阻力太大，失速严重；攻角为负数时，石头会像刀片一样直接插入水中。需要注意的是，攻角与抛射角有关，但二者是不同的，不可混淆。



再次，石头片速度越大，与水面接触时所受到的冲力也越大，这样向上的分力才足以让它弹跳起来，速度越大动能越大，这样它才承受得起多次跳跃中的能量损耗。

最后，石头片要在连续跳跃中保持稳定，需要其攻角相对固定，从而要求石头片整体方位角保持稳定。这也就是打水漂时让石头片高速旋转的目的了——给它一个较大的角动量，让它像陀螺一样保持相对稳定的姿态。

正是以上四个条件，让石头片充分借助水的力量，在水面连续跳跃，不至于立刻下沉。



45.不透明的磨砂玻璃为什么贴上胶带就变透明了？

要明白磨砂玻璃怎么变透明的，就得先看一下磨砂玻璃为什么透光却不透视。磨砂玻璃也叫毛玻璃，其特点就是有一面是磨砂面。磨砂面表面粗糙，不像普通玻璃那样光滑。这个很容易理解，如果身边有磨砂玻璃的话，你用手摸一下就能感觉到明显的差别。正是这“粗糙”的表面，造成了磨砂玻璃“透光却不透视”的特点。

如果了解反射，你一定听过反射里面两个相对的词——镜面反射与漫反射。

由于镜面平整，镜面反射反射的光束很“整齐”。漫反射反射面粗糙，反射线“乱七八糟”，这些“乱七八糟”没规律的反射线进入眼睛，我们就看不清它反射的物体是啥了。所以，镜子都用光滑的玻璃制作，而不会用粗糙的毛玻璃制作。“透光不透视”的原理相似，光线是能透过磨砂玻璃的，在磨砂玻璃的“毛面”，由于界面不规则，折射光线“乱七八糟”，我们也就不能透过磨砂玻璃看清东西了。

想要“破坏”这种“漫”效应，就得消除玻璃表面的粗糙。方法嘛，就是用折射率相近的“东西”来填充表面的“凹陷”使其变得光滑。石英玻璃的折射率是1.46，和水的折射率1.33比较接近，所以用水刷一下磨砂玻璃表面，也能使其变透明。因此，浴室装磨砂玻璃时，磨砂面都朝外。如果用胶带贴上磨砂玻璃的“毛面”，胶带的胶会填充“毛面”，使其不再粗糙，这样也有透视的效果。

看来用磨砂玻璃保护隐私，还是挺不靠谱的。



46.为什么下雪后会感觉很安静？

能发现这个问题，提问者一定是一个心细如发的人。

雪花是水的一种常见的物态，人类对雪花的研究开始得比较早，认识也比较深入。雪花很轻，是从天上“飘”落到地面上的。它千奇百怪的形状，还有这种轻轻“飘落”的性质，决定了积雪不能致密（人踩过车轧过的不算），只能处于蓬松多孔的状态。

那么接下来我们就要讲到声音的吸收了。我们知道声音是一种机械波，是靠空气的振动来传播的。而空气的这种振动最害怕遇上蓬松多孔、容易发生非弹性形变的物质（如海绵），因为声音传到这些小孔隙里之后，会经过多次反射，直至把能量耗光，只有较少的一部分能逃出小孔隙，继续传播。市面上很流行的泡沫隔音板就利用了类似的原理。下雪比较安静也是因为这个。

关于吸音，其实还有很多可以说的。我们这里再简单提一下。

我们身边有很多场所是需要做吸音处理的，例如会议室、音乐厅。这里用到的吸音原理就比较多了，不单单是上面所说的小孔隙吸音。其中较常用的原理是共振吸音，一些功能性场所需要吸收特定频率的声音，这时可以用一些材料，其固有频率比较接近需要吸收的声音的频率，该频率的声音传播到材料上时，吸音材料就会发生共振，把声音吸收然后耗散掉。



47.空调为什么能吹出冷热两种不同的风？

空调是一种典型的通过做功把热量从低温热源搬运到高温热源的逆工作热机。其中的原理是：在循环过程中，工作物质在低温区汽化吸热，然后在高温区液化放热，从而实现热量从低温区向高温区的流动。

空调主要由四个部分组成：压缩机、膨胀阀、室内机和室外机。在制冷过程中，压缩机将低压气体压缩送入室外机液化放热变成高压液体，再通过膨胀阀变成低压液体，然后工作物质经过室内机汽化吸热，变成低压气体，重新进入压缩机完成循环。工作物质不断经过此循环，从而使室内温度降低，这时室内机是蒸发器，而室外机是冷凝器。要完成制热过程，只需工作物质反向循环就可以了，切换工作物质循环方向是通过一个叫四通阀的元件完成的。这时室外机是蒸发器，室内机变成冷凝器。

空调的工作效率受热力学第二定律限制，室内外温差越大，则制冷（制热）效率越低。所以，物理君请大家在夏天把温度调高一两摄氏度，在冬天把温度调低一两摄氏度，省电省钱，节能环保，爱护地球，造福子孙后代。



48.为什么浪花是白色的？

我们先讲讲水和海洋。我们都知道，水是无色透明的，而海洋是蓝色的。那么为什么海洋是蓝色的呢？因为海洋中发生了瑞利散射，所以我们看到了蓝色的大海。

那么，你肯定会好奇为什么浪花是白色的。首先，浪花其实是破碎的波浪，波浪破碎的时候会卷进一些空气，所以浪花的组成成分不仅仅有水，还有气泡，这些气泡对浪花的颜色有着至关重要的影响。气泡的表面是膜状的，上面的小水珠就像一个个棱镜；当光线照在浪花上的时候，浪花表面会发生多次的反射以及折射，最终光线从不同方向反射出来。各种颜色的光反射概率相等，浪花就变成了我们所熟悉的白色。



49. 在一个温度相同的环境中，不同的东西为什么摸起来温度不一样？

热力学第零定律告诉我们，和同一个物体分别处于热平衡的两个物体之间也处于热平衡，即两个物体温度相同，大量的实验都证明这条定律是正确的。那么为什么在同一个环境里不同物体摸起来温度不一样呢？问题一定出在“摸起来”上。

准确地讲，这是测量方法的问题。测量物理量的原则之一就是尽量少让被测量系统产生扰动。我们用“摸”的方法去获取一个物体的温度往往会违背这个原则。以触摸冬天室外的木块和铁块为例，手的温度比较高，所以当你感受到木块的温度时，实际上你感受到的是被手加热过的木块的温度，同样的道理也适用于手摸铁块的情形。两者给人的感觉不同，原因在于铁块和木块导热能力不同，铁块优异的导热能力使得热量刚传递到与手接触的部分就被其他部分带走，而木块导热能力差，吸收的热量会积累在木块和手接触的部分，所以木块摸起

来更暖和一点。因此，尽管两者原本处于相同的温度，但手对两者的影响不同，所以两者摸起来温度不一样。

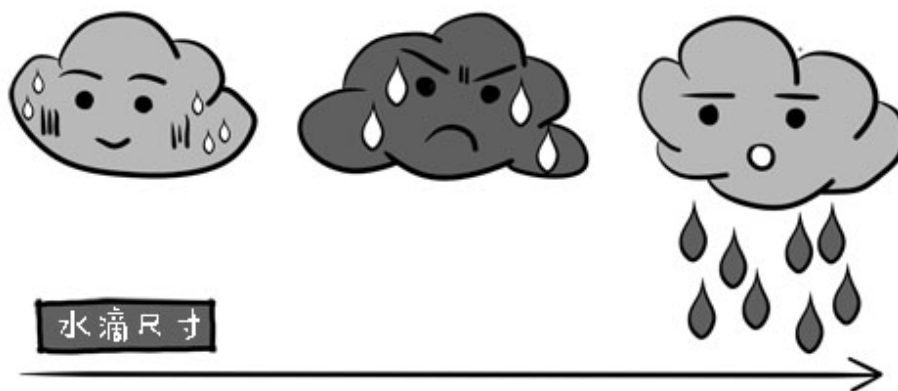
精确的测量方法应使用温度计。虽然温度计也会对被测量物体产生扰动，但是温度计本身可以提供的热量很少，所以对被测量体系扰动不大，这时，我们可以认为测量到的温度就是物体的真实温度。



50.云的本质是什么？为什么白色的云不容易下雨，而黑色的云容易下雨？

云的物理本质是浮在空中的小水滴和小冰晶群。我们肉眼观察到的云形是大量小水滴和冰晶群组成的轮廓，其内部在不断运动和变化。

夏天，我们经常看到天上乌云密布，然后下起暴雨，之后雨过天晴，天上飘着白云。其实，高温使地面的水蒸发到空中，而高空温度较低，白云就是空气中水蒸气围绕凝结核（比如说细小颗粒、尘埃）形成的小水滴，这些水滴聚集多了就变成了我们肉眼观察到的白云。随着水蒸气继续聚集，水滴越来越大，白云就变成了乌云。



那么为什么水滴变大可以使白云变成乌云呢？我们知道水滴直径是微米级的，因为粒子线度大于10倍的入射光波长（考虑人眼可以观测到的400~760纳米段），所以我们应该利用Mie散射理论来解决这一问题。根据Mie散射理论，光强和颗粒大小成反比，因此水滴变大会导致光强变小，也就是亮度变低。

我们常说的“天黄有雨”也源于灰尘和水滴聚集。



51.为什么推一下笔，笔往前走，它还会来回滚几下再停？它受到了什么力？

首先表扬一下这位题主，你对生活细节的观察很到位。

我们通过理论计算发现，如果笔杆是严格意义上的圆柱形（重心位于中心），桌面也是严格意义上的平坦（平坦不代表光滑，也就是说摩擦力依旧存在，不然笔也停不下来），那么笔杆一定会直接停下来，而不是来回滚几下再停，这是牛顿力学所决定的（有兴趣的读者可以简单推算一下）。

因此，出现来回滚动几下再停只可能是因为笔杆的重心并不是刚好在正中心，或者桌面有一些很细微的凹凸，或者二者皆有。笔杆大致呈圆柱形，与桌面的接触面积很小，对上述的两种扰动十分敏感，而笔杆最后停下来的位置肯定是势能最低的地方（重心最低），因此笔杆一般情况下会来回滚动以调节自身的位置，从而最终找到一个稳定平衡的位置。

另外，物理君反复试验发现，一般情况下第一个原因是主因，即笔杆的重心不是刚好处于正中心。当然，读者也可以自己做个小实验看看，方法很简单，在笔杆上做个标记，然后多滚动几次笔杆，看看是不是每次笔杆最终停下来时都是同一部位贴着桌面。



52.水滴滴到浅水中为什么会出现小露珠？

这就是所谓的“反气泡”。我们都知道，气泡是液体包着气体形成的，而反气泡则相反，它是由一层气体包着液体形成的。当液滴周围的一层空气进入液体时，液滴和液体不会马上相融，而会暂时保持原状，周围的气体隔开当中的液滴，形成反气泡。当出现在液体表面时，如果有空气层的有效隔绝，液滴也不会马上与液体相融，而会在表面上滚动几下，这应该就是题主所说的小露珠了吧。

应该说，降低表面张力是有效形成反气泡的途径之一。这是因为表面张力会使表面绷紧，呈现缩小趋势，而降低表面张力可以使表面易于变形，便于空气介入。物理所公众号2017年7月1日“正经玩”栏目里就有关于反气泡的小实验。洗洁精就是一种表面活性剂，有降低表面张力的作用。感兴趣的同学可以复习一下。



53.假设热水器里放出来的水温度基本恒定后是35摄氏度，关掉水，等一会儿再打开，水温可能会从33摄氏度变成37摄氏度再变成35

摄氏度。这是为什么？

物理君在第一次用热水器的时候也遇到过同样的疑问，其实这是一个非常典型的理想条件和实际情况有差别的例子，用理想情况下的结论解释实际现象难免会出现一定的偏差。我们先看一下热水器是如何把冷水加热的：热水器包含水箱（为简化叙述我们只讨论一个水箱的情况）、进水管、出水管和加热装置（加热管等）。当热水器正常工作时，冷水进入水箱，被加热装置加热，然后热水通过出水管流出，整个过程达到一种短时间的动态平衡，加热装置的热量持续地被冷水带走，这样我们就可以获得温度恒定的热水。

但是，当我们关闭出水口时，这种平衡就被打破了：水箱中的水不再有新的冷水补充，不过这时加热装置并没有立刻停止加热，因为即使断电了，加热装置的温度还是高于设定温度，这部分多余的热量会对水箱里的水持续加热，从而导致水的温度高于设定温度。当你重新打开热水器，首先流出的是出水管残留的被冷却的水，然后是水箱残留的过热的水，接下来是刚进入水箱还没来得及加热的水，最后才是稳定的热水。这就是奇怪的温度变化出现的原因。



54.为什么磁铁高温加热后会失去磁性？

磁铁中有一个又一个极微小的磁铁（磁矩或磁畴）。你可以想象有这样的两股力量：一股是小磁铁之间的力量，由于小磁铁同向时能量比较低，两个小磁铁之间就有一股力量让对方与自己同向；另一股是热运动的力量，温度越高小磁铁的运动越剧烈，越不能老老实实地处于一个方向不动。前者有利于磁铁整体拥有磁性，后者却破坏磁铁

整体磁性。如果在绝对零度，没有后者，所有小磁铁都在相互作用下老实待在同一个方向，磁铁整体也就具有磁性；大于绝对零度而在某个特定温度以下，虽然小磁铁具有热运动的力量，但温度不足以让小磁铁完全不老实，在小磁铁之间的相互作用和热运动的共同影响下，磁铁仍然在某个方向上具有整体磁性。但温度大于特定数值以后，小磁铁就获得了完全不老实的力量，不会整体趋于某个方向，而是处在杂乱的状态。这个特定的温度，就叫作居里温度。



55.为什么超过声速会产生音爆呢？超过光速会产生光爆吗？

当物体在空气中运动时，它实际上会挤压在其前方的空气，形成所谓的激波。激波以声速在空气中传播，当物体的运动速度超过声速时，被压缩的空气就会在物体前方堆积，产生极大的阻力。物体运动时产生激波的波前会分布在一个圆锥面（马赫锥）上，在这个锥面上，空气的压强、密度等参数都会有很大变化，当激波面穿过人耳时，耳朵的鼓膜会感受到这种压强的变化，因而会听到巨大的轰鸣声，这就是音爆。事实上，在介质中，带电粒子的速度超过介质中的光速时，也会产生类似的现象，这就是切连科夫辐射。



56.为什么激光的光斑看起来是很多细微的小光点？

恭喜慧眼如炬的你发现了激光散斑现象！这本质上是光的干涉效应。激光具有良好的单色性和相干性，当它照射到一般物体的粗糙表

面上，再从凹凸不平的地方反射到眼睛里时，会有一个微小的光程差，光波因而相互干涉，有的相长，有的相消，从而形成有明暗分布的斑点。这里提到的粗糙是相对于光的波长（几百纳米）而言的。与之类似，激光透过表面粗糙的玻璃（如浴室的毛玻璃）时，你从背面也可以观察到细小的散斑。然而以上知识点太简单了，我们可以稍加深入，做一些有趣的拓展。

当反射面或透射面上的凹凸起伏随机时，散斑没有明显规律；而如果在被照射的透明板上特意设计和制作图案 P ，就可以让射出的无数束光相互干涉（其实就是衍射）形成特定的图案 P' ，二者可以用傅里叶变换联系起来。玩具激光笔的前置图案头、酷炫的全息图等都与这个原理相关。

举个最简单的例子，你可以在镜子上划一道痕迹（若有人因此挨打，物理君概不负责）或者放一根头发（脱发的朋友请珍重），用激光照射镜面，并让光线反射到墙上，这样你很容易观察到明暗相间、整齐排列的单缝衍射条纹，运气好的话，照到圆形的坑点或细小的灰尘，激光会在墙上映出一系列类似牛顿环的同心圆来。麻雀虽小，五脏俱全，可别小看普通的激光笔哦，在家里完成这些实验毫无压力，快去试试吧！另外特别提醒一下，由于波长越长衍射效应越明显，选用红色激光会比绿色、紫色的更容易观察到现象哦。



57.哪种材料可以取代硅，成为下一代支持微电子产业发展的材料？

随着加工技术的进步，硅材料在微电子产业领域还能发展很长一段时间，硅材料的加工工艺已经相当成熟，不是说取代就能取代的。我们现在研究新材料，并没有抱着取代硅的目的，只是希望能找到性能更好的材料来满足不同领域的需求。

任何一种材料都有自己独特的性能，现在还没有一种材料能面面俱到，我们只能对新材料因材施教，取长补短。举个例子，现在比较火的石墨烯与硅相比迁移率高，电导率高，柔性透明，因此在透明柔性导电膜领域有着潜在的应用价值，但石墨烯也有它的问题，其开关比很低，无法用于逻辑器件。再举个例子，现在兴起的类石墨烯二维半导体材料与石墨烯相比虽然迁移率不够高，但光电性能非常独特，在单光子激光器等光电器件的研究中非常重要。

画重点：信息社会是一个多样化的社会，材料也是多样化的，各种材料互帮互助，能满足社会进步的需求才是最重要的。



58.两平面镜夹成一个小于 180° 的角，夹角中放一物体，为什么在夹角中看到不止两个物体的像？

很明显，两个镜子共形成了三个虚像。

我们把左中右三个虚像记为像1、像3、像2（不要怀疑你的眼睛，数字没有标错），把左右两面镜子记为镜1、镜2。这个现象可以这样解释：物体在两面镜子中分别形成两个虚像（像1和像2）；然后像1在镜2中、像2在镜1中分别形成虚像。两个虚像相互重合叠加形成像3。

像3继续在镜1、镜2中成像，但是新的像和之前的像都是重合的。所以，最终结果就是两面镜子形成了三个像。

你可能会问，虚像怎么在镜子中成像？其实物理过程是这样的：物体反射的光经过镜1的反射形成像1，反射光对镜2而言和摆在像1处的物体发出的光完全一样，所以镜1的反射光又经过镜2反射形成了像3，而像3的位置就是摆在像1位置处的物体经过镜2所成虚像的位置。说句人话就是，通过画光路你会发现像1和像3与镜2镜面对称，所以也可以说像3是像1在镜2中的虚像。一般来说，当夹角可以被360整除时，虚像个数是 $(360/\text{度数}) - 1$ ，读者可以自行分析无法整除的情况。

脑洞篇

01.可不可以算出伞的最佳撑法？

这个问题好可爱。

这个很好算嘛。指导思想是，伞面应该尽量与雨滴的运动方向垂直。这样，用雨的横向速度（因为有风嘛，所以有横向速度）减去（矢量减）你运动的横向速度，就得到了雨相对于你的横向速度。这个横向速度与雨滴垂直下落的速度的比值，是雨滴与地面夹角的余切值。这里套一下反余切函数，你就得到了想要的夹角值。伞把向着雨势方向倾斜，这个夹角就是倾斜的伞把和地面的夹角。

思考题：在雨中打伞，人怎么移动淋雨最少？



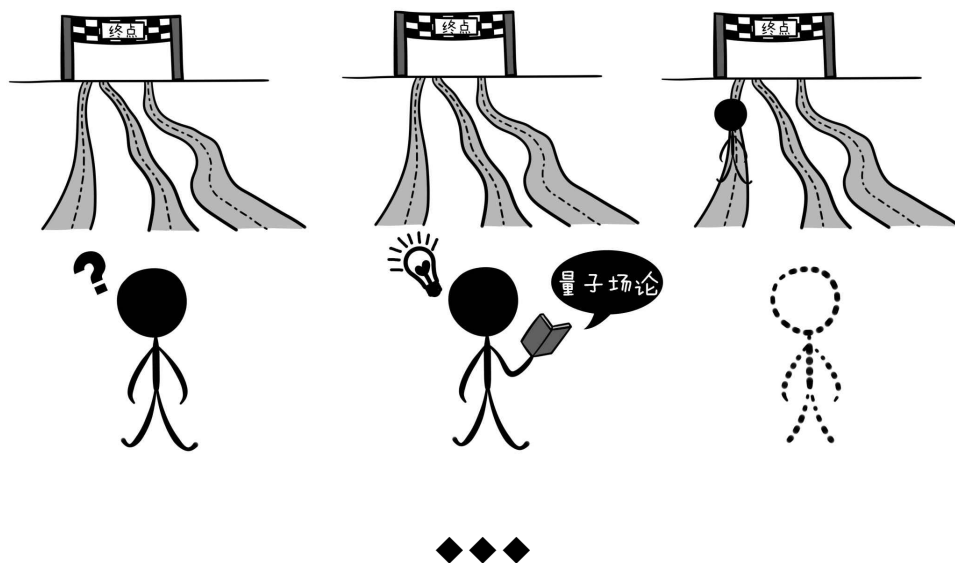
02.为什么光走的路程总是最短？光怎么知道那条路最短？

这个叫费马定理，严格的表述是：光走过的路程总是一个泛函极值（一阶泛函导数为0）。问题是，为什么光知道这条路径是一个极值呢？（这条路径总是最短的，有些情况下也是最长的，但总之是极值。）光有意识吗？

光当然没有意识了。这个定理让人不舒服的一点在于，它不是一个局域的理论，不是“前一瞬间的物理状态决定下一瞬间的物理状态”那种理论。它是一个总揽全局的理论，就好像光已经走过了无数条路径，最后选了一条最短的。

不过，这还真的比较接近事实（容物理君坏笑一下）。在量子力学中有一个路径积分表述：我们可以认为光在运动的时候同时走过了所有可能的路径，然后各个路径互相干涉叠加抵消（这有点像薛定谔的猫，又有点像光学中的菲涅尔原理），最后得到的就是这道光的实际路径。而在经典极限下，也就是当普朗克常数趋于0的时候，那些不是泛函极值的路径迅速干涉抵消干净，最后剩下的经典路径就是一条一阶泛函导数为0的极值路径。

（想了解更多的同学快去翻翻费曼的物理学讲义吧。这个问题里面营养很多的，都是可以细嚼慢咽的那种。）



03.既然光速是定义值，人们为什么要用299792458米/秒？为什么不定义个好记的，比如300000千米/秒？

这就说来话长了，咱们得从物理学的源头说起。

几千年前，人们定义了最早的两个物理量：长度、时间。有了长度和时间，人们自然就可以定义速度了。力学发展起来后，我们又定义了加速度、力、动量。再往后，物理大厦越来越高级，我们又定义了更多的物理量：电流、电压、电感、介电率、磁化率……

我说这些，目的是让你心中有一个意识：物理量的出现是有先后顺序的，后出现的物理量在单位的选取上一定要遵从已出现物理量的单位习惯，否则容易乱套。

长度的国际单位是米，它最早的定义是通过巴黎的地球子午线长度的 $1/40000000$ ，而时间单位秒的最早定义是地球自转一次所花时间（一天）的 $1/86400$ ，这里 $86400=24\times60\times60$ 。

人们从17世纪就开始测量光速了，在19世纪测出的光速已经很接近现在的测量值了。1862年，傅科（Jean-Bernard-Léon Foucault）的实验测得的光速是298000千米/秒。

同时期，英国物理学家麦克斯韦提出了麦克斯韦方程组，统一了电磁学，也证明电磁波的真空传播速度等于真空介电常数与真空磁导率的乘积的平方根的倒数。他发现这个速度与光速高度一致，从而断言光也是电磁波，这一点后来得到证实。

历史课补完了，现在我们回到问题。光速是定义值吗？可以是。我们可以把光速定义为真空介电常数与真空磁导率的乘积的平方根的

倒数。

那我们为什么不把光速定义为300000千米/秒，而要用299792458米/秒这么奇怪的数？因为299792458米/秒是在原有长度时间单位制下的实际测量值。我们可以把光速定义为300000千米/秒，但那会与已经出现的物理量的单位习惯产生冲突。

可是，光速是可以用理论推导出来的量，这并不是一个完全独立的实验测量值，这个矛盾该如何解决呢？

理论推导告诉我们的其实是这样一件事：真空介电常数、真空磁导率、光速，这三者只有两个是独立的。这就好办了，后出现的物理量遵从先出现的物理量的习惯。在这里，真空磁导率是辈分最小的软柿子。我们重新定义它就好了。这就顺便解决了很多朋友的另一个疑惑：为什么真空磁导率的值（ $4\pi \times 10^{-7}$ 特斯拉·米/安培）这么整齐？因为这根本就是人为定义的呀！

后记：为了更精确、更严谨地定义国际单位，对于米的定义，人们在1967年抛弃了依赖地球的老办法，改成了“光走1秒的距离的1/299792458”。秒的定义也经过了修改，现在的定义基于能够保障其精确性的铯原子振荡频率。

以上就是米和光速这对冤家的故事。



04.在台风的风眼扔一颗原子弹会怎么样？

物理君要赞美这个脑洞！哈哈！

这应该没什么影响，原子弹的冲击波范围也就十几千米吧。一个大点的台风风眼直径动辄二三十千米，更不要说外围几百上千千米的气旋了。原子弹连风眼都填不满。大自然说，你们人类完全不够看啊。

我知道，这肯定不是你们想要的答案。那我们来脑补一个特别特别大的原子弹和一场小型台风吧！

首先台风眼是地表的低气压中心。大气从四面八方流向风眼，然后在风眼外围涌向高空。在那里丢一颗原子弹，原子弹释放的大量热量会使台风中心的气压短时间升高。这使得台风短时间减弱。然而这并没有（那个什么）用，热空气会迅速往上层大气涌，这又加剧了地表的低气压，于是更猛烈的台风即将产生。

所以，核弹对台风是完全没有办法的。这是螳臂当车呀！砸颗小行星说不定有用。



05.水热是因为水分子剧烈运动，但是为什么不管如何搅拌水，水都不变热呢？

水的比热容是 4.2×10^3 焦耳/（千克·摄氏度），假设一杯水有200毫升，把它从20摄氏度加热到100摄氏度需要多少能量呢？答案是67200焦耳，这个能量足够把一个正常的成年人竖直往上托举100米。

虽然搅拌的时候能量的确全部变成了水的热量，但很可惜，那个量实在是太小了。

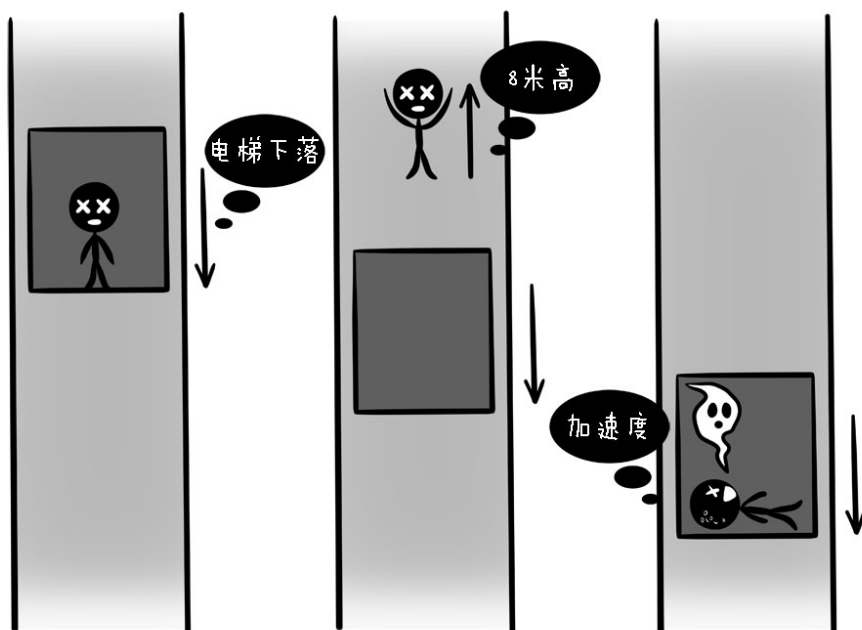


06.如果失控的电梯在做自由落体运动，里面的人在电梯即将落地时跳起，电梯在人落地前落地，那么此人会受伤吗？

别笑，很多人小时候都想过用这种方法避险。答案当然是不行了。我们详细分析一下为什么不行。男子跳高世界纪录是2.45米，别忘了这是背越式的，运动员实际重心升高不到2米。这还是在有助跑的情况下。美国职业篮球联赛球星克里斯·韦伯（Chris Webber）原地起跳纪录是1.33米，别忘了人家跳之前会下蹲蓄力加抬腿。

很不幸，你在自由落体的电梯里面，所以别说助跑了，下蹲都做不了。

现在，假设我们什么都不管了，我们疯了，我们认为你骨骼清奇，原地一蹦2米高。可那又怎样？比如，电梯从10米高的地方失控，那你蹦完之后速度一抵消的效果，等于你从8米高的地方开始失控。你还是“妥妥滴”……



现在，我们假设你是不世出的绝顶高手，苦修40年就是为了今天，你一蹦10米高！而且电梯天花板也非常懂事地先自己消失一会儿。这回你终于能活下来了吧？

很遗憾，并不能。你还是“妥妥滴”.....

要记住，真正杀死你的不是速度，而是加速度。



07.太阳温度那么高为什么没蒸发？

第一，太阳表面已经是气态和等离子态了；第二，太阳表面引力很大，是地球的28倍，气体无法逃逸到太空中去。（耀斑和日珥是例外。）



08.人、老虎之类个子大的生物从高处掉落会摔死，而蚂蚁、蟑螂之类的小动物似乎从多高处掉下来都不会摔死，请问这是为什么？

这个问题很好，我们分两部分解释。

第一部分关乎空气阻力和终止速度。在空气中，自由下落的物体的速度并不会一直增加，当空气阻力等于重力时，物体就匀速下落了。这时候的速度叫作终止速度。一个物体受到的重力大小跟它的体积，也就是线度的立方，成正比，一个物体的空气阻力大致与速度跟截面积（线度的平方）的乘积成正比。如果空气阻力等于重力，我们立即就得到一个结论，终止速度与线度成正比。也就是说，越大的物体终止速度越大。

第二部分关乎标度变换与强度的关系。我们在很多地方都看到过这样的描述：蚂蚁能举起相当于自身体重几十倍的重物，如果蚂蚁像人那么大的话，它就能举起卡车。这个说法其实是不对的，这里错在把标度不变性套用在了不具有这种性质的对象上。如果蚂蚁真的像人那么大，它唯一的命运就是几根纤细的腿被自身体重压得站都站不起来。

这里的原因和上面提到的原理相似。因为重力与线度的立方成正比，而支撑你身体的骨骼的强度只正比于骨骼的截面积，也就是线度的平方；你的运动能力只正比于肌肉的横截面积，也是线度的平方。这导致的后果就是：结构相同的情况下，动物越大越脆弱，越容易受伤。

（蓝鲸离开水面很快就会死亡，但死因并不是窒息，它是用肺呼吸的！关键在于，蓝鲸体重太大，离开水后血压激增，导致心力衰竭。也就是说，它们会自己把自己压死。）



09.我们穿越回古代（比如秦朝）能发电吗？

为了这个问题，物理君专门跑去翻了《史记》，这真是太为难理科生了。（不过术业有专攻，我尽力而为，如依然有史实错误，望勘正。）

首先，秦朝的青铜冶炼技术已经非常成熟。而生铁冶炼技术始于春秋后期，西汉开始大范围应用，秦朝的冶铁技术就算没有成熟也不会差到哪里去。这样我们就有了两种电化学活性不同的金属，青铜和铁，理论上就有了制造原电池的可能性。不过，由于铁和铜的电化学活性差得不是特别多，再加上铁中杂质多，青铜中又掺有少量锡。因此，这个原电池的效率必定是极差的。

当然，光有金属电极还不行，还要有酸和盐组成的电解液。这在秦朝还真不一定有。因为常见的酸性植物，番茄啊，柠檬啊，那时都还没引进。唯一本地产的柑橘又在南方，而中国的南方大开发还要等到三国和南北朝时期。好在我查了一下，发现“橘生淮南则为橘，生于淮北则为枳”这句话原来出自《晏子春秋·内篇杂下》。我顺手还发现原来春秋时期我们就已经有醋了！所以酸液也有了！因此，在秦朝，虽然电灯泡是完全没有机会造出来的，不过电池可能真的能造出来哦！

这还没完，秦朝有没有磁铁这个事情似乎还没有定论，但磁铁是可以造的。将铁粉部分氧化成四氧化三铁，然后烧结成块材，再让它缓慢降温到居里点以下，这样它就可以在地磁场的诱导下成为一个比较弱的磁铁（这是富兰克林说的）。这样，有了磁铁，有了铁铜做的导线（当然，那时的铁铜有可能延展性差，不足以制成线，不过无妨，不行我们就用金嘛），彼时蜀郡郡守李冰正在兴修都江堰，当时的人有一定的水利工程能力，那么……你懂的。



10.数学为什么一定要以十进制为主？为什么没有人从不同进制研究素数在数轴上的分布规律？

因为数学家清楚，素数的分布和进制是没有关系的。5在十进制中是素数，在二进制中也是素数，只不过把名字换成了101罢了。

所谓二进制、十进制，实际上只是数的不同表示，就像物理中不同的单位制一样。一个物体有多重就有多重，并不会因为单位从千克变为盎司就有所改变。



11.一只苍蝇在汽车里飞，没有附着任何东西，它为什么会相对地面跟汽车保持一样的速度？

它并不是没有附着任何东西。它附着空气。空气附着车。

其实常见的一类问题个个都可以用上面这句话回答。比如：为什么飘在空中的热气球还是会跟着地球自转？因为空气跟着地球自转。空气之所以跟着地球自转，是因为如果不这样，地表就会不停地摩擦空气，使它慢慢转起来，直到达到稳态。



12.人的正常体温通常是37摄氏度左右，可为什么环境温度还没到30摄氏度人就开始感觉热，37摄氏度的时候就会热到变形？

37摄氏度真的会让人热到变形哦。

人体会发热，静息情况下（不走不跑不跳不表白不被表白），一个成年人的发热功率大概相当于一只100瓦的电灯泡。在不发生别的变化时，热量只会自发地从高温流向低温，且温差越大流得越快。如果环境温度跟体温一样都是37摄氏度，那这些自身产热就很难流出体外。人体又是一个特别精细的系统，多一两摄氏度都是要命的。但如果没有散热，一个50千克的成年人的自身产热只需不到一个小时就可以将体温上升一两摄氏度。所以室温37摄氏度的时候，人体一定会大量排汗，通过蒸发吸热来带走体内热量。换句话说，热力学告诉我，环境温度37摄氏度一定会让你出汗，你不出汗就中暑了，快往医院抬。

另一方面，太冷也不行，太冷就要身体额外消耗能量来保暖了（比如抖）。综上，20摄氏度就是一个可以愉快散热又可以不用保暖的刚刚好的温度啦。



13.如果一个立方厘米的空间里面填满质子，它的质量会是多少？换成电子呢？

一个立方米的空间塞满质子，那密度就和中子星的密度差不多了，也就是每立方厘米（一个骰子）几亿吨。换成电子的话，密度大概是这个的两千分之一。顺便说一句，如果把地球上的物质都按这种

办法紧密地安排上，那地球就成了一个直径大概22千米的球，投影面积比北京二环大一点点。



14.围棋棋局的变化数真的比已知宇宙的原子数还多？

不是多，是多得多得多得多。

标准围棋是 19×19 的棋盘，总共361个落子点，每个点有放白子、放黑子和不放子三种状态。那么棋盘总共就有 3^{361} 种状态，约为 10^{172} 。宇宙中已知的原子数大约是 10^{80} 。所以这不是多的问题，假如把很多宇宙加起来让这一堆宇宙的原子总数等于围棋的变化，那么光是这堆宇宙的数量都要比一个宇宙中的原子数量还多。



15.把核废料投到活火山口里会怎么样？

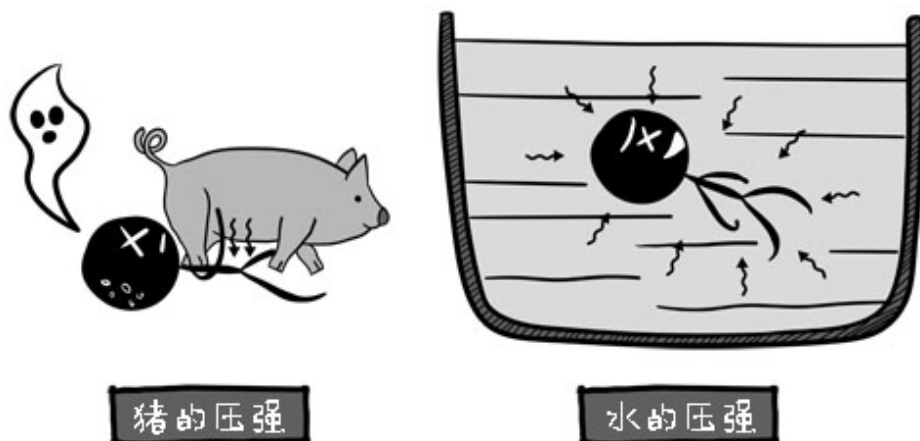
那么核废料会充分地熔解在岩浆中并流得到处都是……



16.据说一头200千克的猪四脚站在地面上时，对地面的压强约为一个大气压。水下10米处的压强相当于增加了一个大气压。那么潜水

员要如何承受住来自各个方向的猪的踩踏呢？

用一个手指头轻轻戳一下鸡蛋，你很容易把鸡蛋戳碎；把鸡蛋握在手中使劲捏却不那么容易捏碎。这是因为鸡蛋被握在手里时是均匀受压的。



换句话说，虽然过大的压强的确对物体有破坏作用，但压强分布不均匀带来的剪应力对物体的破坏作用更大。而分布均匀的高压在一定程度上是比较容易承受的。



17.人类思想意识不同于电脑芯片和程序，它是如何产生和运行的呢？

针对大脑的物理建模我们是有一些的，不过还都处于比较初始的状态。比如，我记得有些（严肃的）论文指出，如果把神经元看作格点，把神经元之间的连接看作格点近邻相互作用，那么大脑的神经元在工作时的状态正好处于统计模型中的相变临界点附近。

解释意识的完美的物理理论目前还没有建立起来。但可以肯定的是，意识也好，大脑也好，都不会违背物理定律。所以（解释大脑和意识）这样的物理理论是可能出现的。凝聚态物理学家信奉一句话——“More is different.”大脑是一个如此庞大复杂的系统。解释它的理论一定是全新且极端复杂的，也许我们很难得到它，也许我们永远也得不到它。但它可以存在。

（本答案包含个人观点，读者请自行判断。）



18.为什么原子弹、氢弹爆炸会有蘑菇云？在月球表面爆炸的核武器是不是就不会有蘑菇云了？

其实原子弹和氢弹在刚爆炸的一瞬间都是一个无差别的球形大火球。但很快，爆炸释放的大量热量把周围空气加热到了很高的温度，热胀冷缩使得周围空气体积膨胀密度变小，在冷空气浮力的作用下开始快速地往上运动，形成“蘑菇柱”。由于热空气在快速上升的过程中一直与周围的冷空气接触，当上升到一定高度后，原来的热空气已经冷却到与周围空气差不多的温度。此时空气不再继续上升，转而向四周扩散或被灰尘拖着下降。但上升气流会不断把周围的冷空气“拽”上来，所以下降气流一定会撞上后面的上升气流，于是被加热再次上升，在一定高度上循环。这就形成了蘑菇顶。

因此，蘑菇云的形成和核弹并没有直接联系，理论上只要炸弹威力足够大，能够在大气层中把大量气体瞬间加热到很高温度，就能形成蘑菇云。

但在月球上却不行，月球上没有空气，当然就看不到蘑菇云这种实质上是气体热对流的东西咯。



19.有真正意义的“单色光”吗？三棱镜分光到无穷远时，能把“单色光”像分颗粒一样分开吗？

实际系统中没有严格意义上的单色光，这是由量子力学中的不确定原理造成的。在量子力学中，光的颜色越“单色”，光子的动量不确定性越小，根据不确定性关系，光子的位置不确定性越大。而位置的不确定性不可能无限大，所以光子不能严格单色。

太阳光分光最后会出现一些分立的谱线。不过原因并不是上面说的这个，这些谱线来自太阳上的原子的原子光谱。



20.如果地球上的植物都消失了，剩余的氧气可以让人类存活多久？

地球大气总质量大约是 5×10^{18} 千克，氧气占比大约20%，那就是 10^{18} 千克。（还挺整！）普通成人每分钟耗氧量大约为250毫升，每天大约就是0.35立方米。70亿人每分钟耗氧大约25亿立方米。标准大气压下大约折合32亿千克的氧。另外，空气含氧量低于10%人就窒息死亡了。于是氧气储量人类只能利用一半。

结论：大概能活 1.5×10^9 天，400多万年。加油喘吧！

（PS：地球岩石圈的氧气储量其实比大气圈要多得多，但是这里不予考虑，因为它们释放得太慢了。）

（PPS：这有啥难的？小学数学题嘛。你们呀，就是不如物理君勤快。）



21.失重状态的人能否点燃蜡烛？能的话，烛火会是球形的吗？

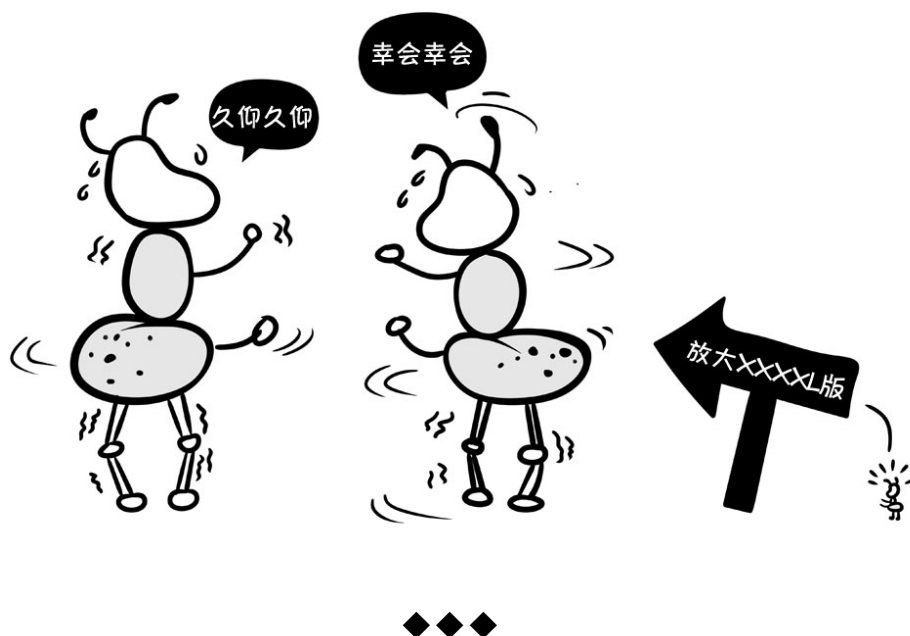
蜡烛的燃烧需要氧气。在失重的条件下，由于没有了热对流，冷空气不会下降，热空气不会上升，充足的氧气也就不能到达蜡烛周围，从这一角度来看，蜡烛是不会燃烧的。但是气体的扩散效应也是必须考虑的。由于蜡烛周围的燃烧产物浓度高，环境的氧气浓度高，氧气就会向蜡烛周围扩散，燃烧产物向空气中扩散，只要扩散效应提供的氧气可以满足蜡烛燃烧的需求，那么蜡烛就可以燃烧。实验表明，在微重力情况下，蜡烛是可以燃烧的，只是燃烧的速率没有重力环境下大。蜡烛燃烧的火焰准确地来说是半球形，因为没有了对流，火焰会分布在烛芯的周围，从对称性来看就会成为近似的半球。



22.如果将昆虫原比例放大，它们的外骨骼要有多硬才能支撑它们的重量？

通常生物的尺寸越大，身体所承受的压强越大。简单的数学告诉我们，在身体构型不变的情况下，身体所承受的压强与尺寸成正比。所以，电影里面的哥斯拉小怪兽在陆地上行走真可谓是“压力山大”。我们可以估计一下，有资料显示：哥斯拉同学的身高约110米，体重达9万吨。如果用人类中最胖的体形做一个比对，那么它的骨骼承受的压强大约是一个正常地球人的200~300倍。这已经超越了人类长骨的压缩强度（约200兆帕）。况且，这还是以人类能承受的最大压强来算的，实际上，比较脆弱的环节像关节、内脏等能承受的阈值比这小得多。这就是为什么陆地上没有特别大的动物。曾经称霸一时的恐龙的最大体形不过几十米长，而且都是标准的短粗腿。

昆虫的外骨骼成分主要是几丁质（一种多糖）和蛋白质。这种材料的强度物理君没有查到，不过显然和人类的骨骼没法相比，而且刚性程度不能满足要求。所以，就算把蚂蚁放大到人类大小也能勉强站起来，但是我们也不愿意看到蚂蚁互相打个招呼整个身体都跟着摇晃的场面。至于题主所问的把昆虫放大，外骨骼要达到什么强度才能撑起它们的重量，物理君只能说原来的外骨骼肯定不行。至于什么材料是合理的和完美的，看看我们的周围吧，神奇的大自然早就把答案说出来了。



23.能简单描述一下闪电产生的原因吗？为什么闪电不走直线，而是分叉的？不是两点之间直线电阻最小吗？

雨天经常伴随出现闪电，闪电的产生包含了许多物理过程：云层和地面由于摩擦等带上了相反的电荷，电荷的集聚使云层和地面之间形成了强电场。空气由各种气体分子构成，其自身并不导电，所以一般情况下我们是看不到闪电的。但这些分子中的电子在强电场的作用下脱离原子核的束缚，空气变成由电子和离子形成的组合体，所以变得可以导电。电子在电场的作用下发生能级之间的跃迁，这种跃迁伴随着发光，这就是闪电。

但是大气中电离物质的分布并不是均匀的，因此空间中两点之间并不是直线通道的电阻最小。且闪电路线沿着电阻小的通道延展开来，而空间中电阻小的通道显然不止一条，所以就会有这样的现象——闪电走的路线是曲折并且分叉的。

综上，闪电分叉的关键有两个，一是导电介质——电离物质的分布，二是这些导电物质的运动。



电离物质来源于太阳辐射、地面辐射，以及宇宙射线与大气分子的作用，一个能量足够高的光子（或其他高能粒子）能将电子从一个分子或原子中“撞”出去，从而留下一个正离子并在“远”处形成一个负离子。因此大气中总存在个别离子，比如失去一个电子或者额外获得一个电子的氧分子。而这些刚刚形成的离子会通过电场吸附周围极性

分子，成为小团块，与其他团块一起在大气电场中到处飘移。其中“大离子团”在电场中移动较慢，而“小离子团”则最易于移动，于是空气中的电导率随离子团大小变化。这些“离子团”分布不均匀是因为高空大气有局域对流以及风在地面刮起灰尘（作为“核”拾取小离子电荷形成大离子），或者人类把各种污染物（PM2.5）抛入大气中，导致靠近地面的电导率变化得很厉害。这也是为何靠近地面时，闪电会出现更多分叉以及弯曲程度更高。

参考信息及文献：

（1）雷暴雨云中电荷分离的理论是威尔逊（C.T.R.Wilson）首先提出来的。1911年，他把这个现象与自己的理论结合改进了威尔逊云室（1896年最先由威尔逊发明）。威尔逊也因威尔逊云室，最早的带电粒子探测器，获得了1927年的诺贝尔奖。

（2）《费曼物理学讲义》，第二卷，第九章。



24.假设我们能看见氢分子，那我们会看到什么景象？我们会看到两个小球在高速振动吗？

不用假设，你确实有可能看见氢分子。

我们先解释一下什么是“看见”。狭义地说，“看见”一个物体表示你接收到那个物体向你发过来的处于可见光波段光子。氢分子不同的

分子势能曲线之间的能级差大概是可见光到紫外波段，只要这个氢分子做了这样的能级跃迁，发出的光子被你接收到（据生物学家说，人眼的感光细胞可以对单光子做出响应），你就看见了氢分子。至于问题的后半段所提到的景象，假设你的“看见”是广义的，比如说你以某种方式确定两个氢原子的位置，并且能分清楚它们振动的位移的话，这种方式带来的扰动必然会影响到这个氢分子的状态。至于电子云，这是电子波函数在空间分布的一种表示方式，只是个概率分布，不可能被看见。



25.假设有一列速度接近光速的火车，静止时的长度比隧道的长度长。它经过隧道时，两道闪电同时击中隧道的两端，但由于动尺变短效应，站在隧道旁边的人看到火车完全进入了隧道，刚好不会被闪电击中。但是，站在车上的人看到的却是隧道变得更短，不可能完全遮住整列火车，那么他看到的闪电会不会击中火车呢？

其实这是一个比较经典的狭义相对论问题。题主的问题可以描述为：在地面参考系看来，隧道两端同时发生的事件，在火车参考系看来它们的空间坐标是否落在火车内？我们通过洛伦兹变换就能得到答案。

狭义相对论告诉我们：如果隧道的长度恰为 $\sqrt{1-v^2/c^2}$ 倍的火车长度，那么能够同时击中隧道两端的闪电也恰能击中火车两端。但是在火车上的人看来，两端遭受电击并不是同时的，他们先看到头部与隧道前端重合，受到一次电击，然后尾部与隧道后端重合又受到一次电击。（还是上车更刺激。）

虽然这个结果有点反直觉，但是这是满足光速不变原理的必然结果。理解相对论的关键在于理解光速这个概念。首先它代表了物质运动相对于一切参考系的极限速度（光只是一个代表），所以速度不可能线性叠加。然后，光速不变是一个原理，也就是一个假设，当然，这个假设得出的推论符合实际，这才是它的价值所在。

物理君在这里还想留个思考题：火车上的人看到的能同时击中火车两端的闪电在地面上的人看来能否击中隧道两端呢？



26. 能不能人工制造海市蜃楼？

海市蜃楼分为上现蜃景和下现蜃景两种。前者一般出现在冰川等寒冷地带，空气密度和折射率在高空小，在地面大，因此景物反射的光在向上传播的过程中会逐渐偏转，最终发生全反射，人眼看到的景物如同浮在空中一样。

下现蜃景一般出现在沙漠或夏天的柏油路上。空气密度和折射率在高空大，在地面小，周围景物反射到地面的光会被地表空气全反射，在人眼中景物如同水中的倒影，让人误以为地面上有一潭水。

海市蜃楼产生的原理并不神秘，事实上我们只需一块折射率有变化的介质就可以看到类似的效果。



27.据说孙悟空是以音速飞行的，因为他的筋斗云就是音爆云，这是真的吗？在水中以音速运动又是怎样的情况呢？

声音的本质就是介质振动的疏密波（纵波）。一架飞机飞行的过程中碰撞空气产生振动，这种振动就以声波的形式向外扩散。

当达到音速的时候，飞机在碰撞自己跟前的空气，而空气却来不及将这种挤压扩散出去，因而被紧密地压在一起，对飞机产生剧烈的阻力和扰动，这一现象叫音障。

在这一过程中，被挤压的空气有很大的压强，高压下空气中的水蒸气被液化成小水滴，形成一片白色的“云”。这一现象就叫音爆云。

音爆云和音爆都只在飞机突破音速的那一刻产生，一般来说持续几秒钟——没有飞机会一直卡着音速飞行。速度完全超过音速以后，飞机自身反倒平静了许多。飞机仍在碰撞空气，但它将自己发出的声音甩在了身后，本来应该以球面波形式传播出去的声波波前此时形成了一个锥形面——飞机在锥尖的位置。

飞机外面的你在“声锥”之外什么都听不到。当声锥界面经过你的位置时，空气压强的突变会使你听到如爆炸一般“砰”的一声，这就是音爆现象。之后你在声锥之内了，听到的就是正常的飞机飞行声。

上面描述的“声锥”有个学名叫激波。在任何介质中，点波源的速度超过介质中的波速，都会产生激波现象。水中声速为1500米/秒左右，如果一个物体能在水中超过这个速度，想必会产生比空气中更加剧烈的激波现象，只不过这样的现象很少被观察到。

虽然水中声速很快，但水面波（就是一枚石子投入水中产生的涟漪）往往波速很慢——一般每秒只有几米。跑得快的船在水面可以产生艏波，这也是一种激波现象。

事实上，这一现象甚至对光也成立。真空光速是不可超越的，但介质中的光速却可以。一些高能粒子可以具有比介质中光速更高的速度，这也会发生类似的激波现象，学名叫切连科夫辐射。这一现象在高能粒子的探测中有重要应用。



28.地球是一个球体，将其表面展开铺平，得到的不该是一个矩形，但为什么时区划分图中的世界是矩形的？

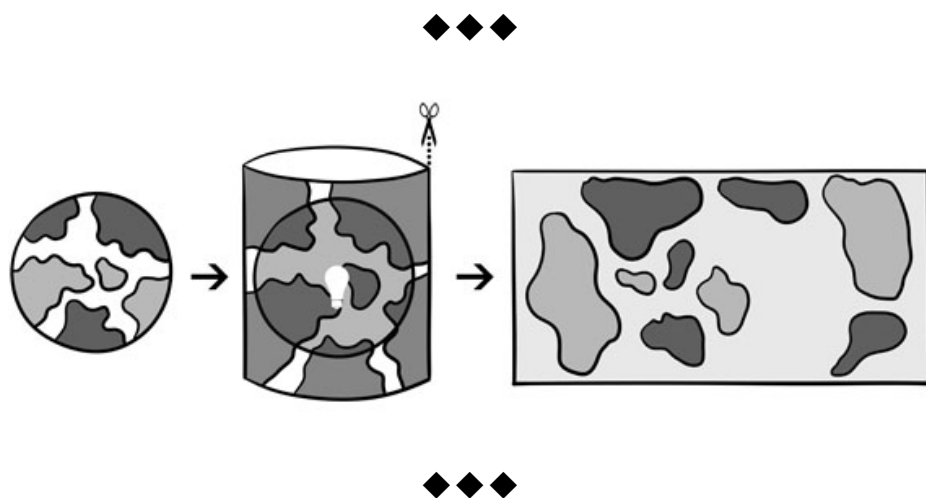
地球是三维空间中的球体，而地图则是二维平面中的图。你没有办法将一个球面变成一个平面。当采用不同投影方式将地球表面映射在二维平面上时，每一种投影方式都会使地球表面产生变形。因此，世界上没有完全精确的地图，各种地图都是为方便实际使用设计的，都会着重保证某一方面的真实性。

时区是以经线来划分的。为便于时区划分，经线划分图上将经线变形为直线。这种地图多采用墨卡托投影制作。这种投影方法，简单

讲就是假设有一个和赤道面垂直的圆柱套在地球上，这时在地心点亮一盏灯，灯光会将地球上各个点映射在圆柱上。把圆柱展开，这种矩形地图就出现了。

不过实际上我们较少用到矩形的地图，因为矩形地图失真很严重。使用墨卡托投影制作的地图，纬线和经线是相互垂直的直线，但纬线越接近两极地区，间隔就越大，到南北极点时，纬线间距离达到无穷大。由此造成的结果，就是地图在赤道地区非常精确，但在两极地区则变形极大。

至于为什么常见的世界地图多接近矩形，这主要是出于地图实用性的考虑。为了不将地球上的大陆生生切断，地图的边缘形状必须较为规则。（想一想，如果你的国家在世界地图上被边缘切开了，你是不是会非常郁闷？）椭圆形的世界地图既保证了失真不特别严重，又使各块大陆、各个国家的形状都能在地图上得以完整地展现。因而，这种出于综合考虑的地图实际使用最为广泛。



29.什么是玻尔兹曼大脑？

玻尔兹曼大脑是一个很有趣的问题。高度无序的系统越发稳定，越发不可能产生特殊变化，例如产生生命。因此生命几乎不可能出现在高度无序的系统中，而是诞生于宇宙较早时期，此时熵极低，可能产生生命（虽然概率极小但却可能发生），并演化成高级生命，比如我们人类。

然而，对于人体来说，单独大脑出现的概率大于人体出现的概率。也就是说，宇宙中很可能出现一种完全由大脑构成的生命，这就是玻尔兹曼大脑。这些大脑很可能存活了下来，并在虚空中进行着超越人类极限的思考，甚至构建出我们所熟知的世界体系。细思极恐！实际上，我们自己都不能确定我们是否生活在我们大脑所构建的模型当中。

这个问题有点像“缸中之脑”的猜想，只不过没有邪恶的科学家，而是以条件概率为基础。历史上，玻尔兹曼确实是在研究热力学时想到的这一问题，但实际上，我们可以通过概率，而不基于热力学讨论它。

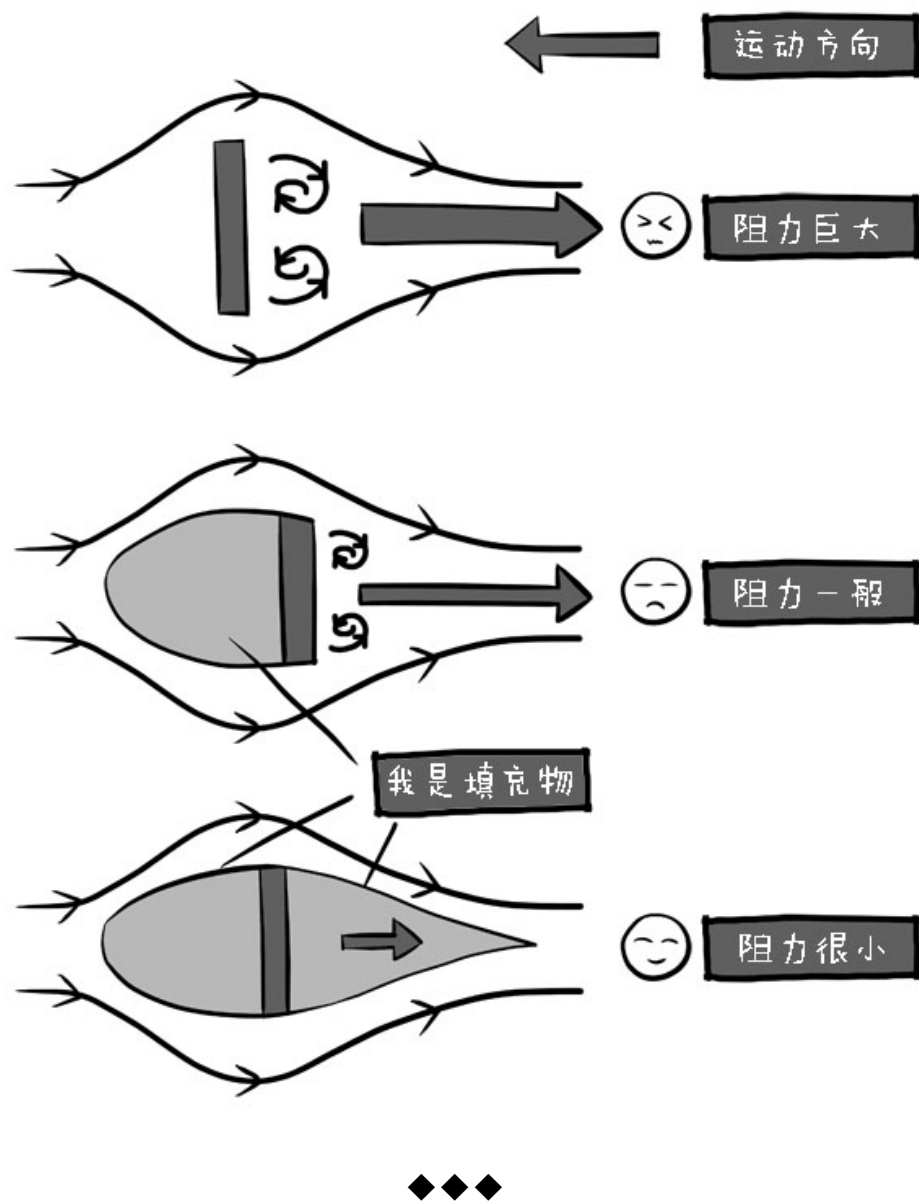


30.汽车、高铁和飞机的表面能不能做成高尔夫球那样表面坑坑洼洼的样子，从而减小空气阻力，减少燃油或电力的消耗？

物体在空气中运动所受到的阻力主要有两个来源：（1）摩擦阻力，又叫黏滞阻力，这是和空气摩擦产生的力；（2）压差阻力，这是

运动物体前方高压区和后方低压区产生的压差带来的力。我们都知道，一块垂直在空气中运动的平板会受到较大的阻力，如果把平板前方（左侧）的高压区用半椭球状的物体填满（如图），那么气流在前方早一点贴合物体，就会使前方压强变小；如果把平板后方的湍流区用一个圆锥状的物体填满，那么后方的气流就会相对较晚地分离，使得后方压强变大，这样就能够减小压差阻力，这就是流线型减阻的原理。

高尔夫球的阻力主要是形状所致的压差引起的，摩擦处于次要地位，凹坑可以延长后方气流的分离时间，减小压差阻力。而飞机本身接近流线型，摩擦阻力占主导，所以凹坑增加反而不利于飞行，何况还要考虑材料强度、成本、外形美观等各种因素。其实，飞机和某些车为了增加气流在物体后方分离的时间，还装配了涡流发生器，可以大幅减小阻力。



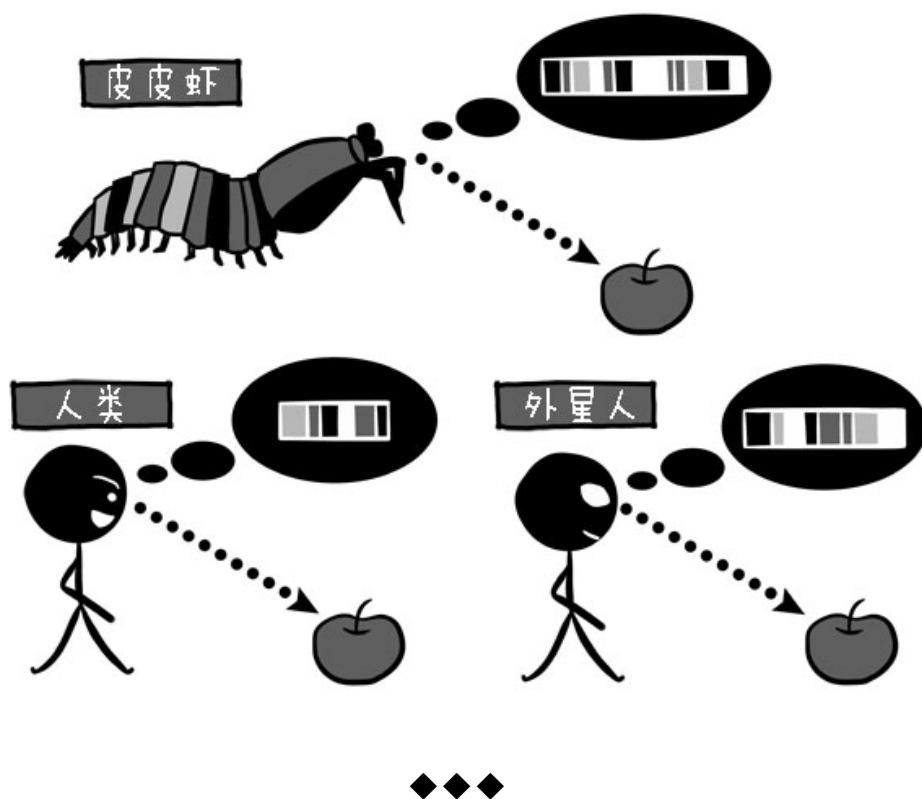
31.外星人的眼睛有没有可能接收红外线或者紫外线？他们会不会比地球人的视野更宽阔？

可能啊，相当可能！其实我们不需要提外星人——难道题主忘了江湖上名震天下、红极一时的皮皮虾？我们要说的不是吃货嘴里那种

土里土气的皮皮虾，而是它的亲戚，色彩艳丽的齿虾蛄科孔雀螳螂虾。这家伙至少有16种视觉感受器，其中6种可分辨普通颜色，6种可分辨紫外线，还有4种可以分辨圆偏振光！是不是很逆天？

其实，视觉方面的能力与生物拥有的视觉感受器种类直接相关，且往往与其生活环境及生存需求密切相关。人类拥有负责感应光强的视杆细胞和负责捕捉颜色的三种视锥细胞；汪星人和喵星人更关心黑夜里捕捉猎物的能力而对颜色需求不大，故视杆细胞更发达而视锥细胞种类比人少；蜜蜂和蝴蝶天天在太阳下面拈花惹草，可以在紫外线图景下分辨各种花瓣；响尾蛇需要精确感应温度变化、判断猎物位置，红外视觉对其非常重要。

至于皮皮虾嘛，这么逆天的能力居然用来谈恋爱！色彩艳丽的外壳只有它能欣赏，圆偏振光的交流暗号也只有它能看懂……同在一个地球，尚且如此不同、各怀绝技，那远在宇宙深处的外星人，你猜会怎样呢？



32.云的主要成分是水滴和冰晶，水和冰都比空气重，为什么不掉下来呢？

物理君童年时也疑惑过，天上那么大块的棉花糖咋不掉下来呢？

其实云是会掉下来的，只是掉下来的速度很慢很慢，这归根结底是因为空气有阻力。云中的水滴半径 r 很小，只有几微米到几十微米，其重量很轻，空气阻力不可忽略，且随水滴下落速度增加而增大，因此这些水滴在空中达到受力平衡时的速率，即收尾速率 v 很小。这还只是空气静止时的情形，实际上云层附近还会有风和上升气流，云随风而飘，有一些在这个过程中消散了，毕竟小水滴也会蒸发。更直观地说，悬浮的小水滴，在天上叫云，在地上叫雾，你看看雾滴的运动，

是不是很慢？而即使是大雨滴，也砸不死人，可见空气阻力的作用还是很明显的。

具体来讲，水滴受到的与半径和速率成正比的黏滞阻力值为 $6\pi\eta r v$ ，方向向上，其中 η 为空气的黏滞系数；水滴还受到重力和浮力，合力大小为 $(\rho - \rho_0) g \frac{4\pi}{3} r^3$ ，方向向下。三力平衡可得收尾速率 $v = \frac{2g(\rho - \rho_0)}{9\eta} r^2$ ，可见该速率与 r^2 成正比，当 r 很小时，速率也很小。云中典型的水滴直径为 $10 \sim 50$ 微米，相应的下落速率为 3.0 毫米/秒 ~ 7.5 厘米/秒，这要落下来得好久好久。而一旦小水滴凝聚在一起，即可很快下落，如直径 5 毫米，则速度约 7 米/秒。不过这是用另一套公式计算的，因为此时空气阻力以压差阻力为主，与 $r^2 v^2$ 成正比，前述公式已不适用。

有趣的是，利用超微液滴收尾速度很慢且与外力成正比这一规律，人们可以精确地测定微小的力。还记得大名鼎鼎的密立根油滴实验吗？在物理上具有重要意义的元电荷 e 的大小就这么测出来了！1923 年的诺贝尔物理学奖就是这么诞生的。



33. 如果在光速飞船上发射一束光，那么这束光难道不会比飞船更快吗？这样光速不就能超越了吗？

在狭义相对论的世界里，不同的参考系中，不仅单个物体的绝对速度不同，两个物体的相对速度也是不同的。第一个问题中的情况可以用狭义相对论的基本原理来解释——光的真空速度在任何惯性参考

系里都是 c （常量）。如果你在飞船里，则认为光以光速 c 远离你；如果你在“地面”（飞船相对你的速度是光速 c ），则认为光的速度也是 c ，而飞船和光的相对速度为0。

感兴趣的朋友可以试试做些简单计算。狭义相对论基于相对性原理和光速不变原理，可得到在不同惯性系中速度的变换公式 $u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}}$

。我们可以看到公式中物理量的对应关系： v 代表 K' （参考系）相对 K （参考系）的速度， u' 代表研究对象在 K' 中的运动速度。知道这些，就可以求出研究对象在 K 中的运动速度。以问题中的情景为例，若参考系 K 和飞船 K' 相对速度为 $v=c$ ， K' 中发出光的速度为 $u'=c$ ，代入公式计算，就可以得到在 K 中的速度 $u=c$ ，在这里我们可以看到理论的自洽。

而第二个问题同样可以通过计算解答。若光速飞船参考系 $v=c$ ，而人相对飞船的速度 $u' \neq c$ ，代入后同样得到 $u=c$ 。

也就是说，不论你在飞船里以多大的速度向“前”运动，别人在 K 参考系里总会认为你和飞船速度相同。怎么样，很不可思议吧？



34.对着手哈气会感到暖，吹气会感到冷。那么是否存在一个吹气速度让人感觉不冷不热？

这个问题的答案是肯定的：理论上可以定义一个吹气速度，我们暂且把它定义为“均衡吹气速度”。

均衡吹气速度可能是非常难以定义的物理量。吹出的气体在运动过程中，气流的变化非常复杂，环境风速、温度、压强以及吹气口型等，都会影响到气流到达手掌时的温度。因此，把这些考虑在内，我们需要在一个稳定的环境中定义该数值。例如，保证环境为标准状态（273.15K，1atm），保持环境风速低于0.1米/秒，保证手到口的距离为定值。

综合以上考虑，外界的问题大多数都解决了。这种条件下，我们吹出具有某个速度的气体，它在到达手掌的时候就能达到一个合适的温度，而且保持很小的误差。注意，这个温度是物理的温度，不是感受的温度。

接下来，我们考虑感受的问题：由于个体差异，不同人对相同温度的感受可能不同，因此，为了简化，我们需要一个“标准人”来测定感受温度（当然，如果不考虑普适，也可以为每个人测定一个均衡吹气速度）。而且，不同的部位对温度的感受也会不同，因此我们还需要选定一个标准部位。另外，由于人对“不冷不热”的气流可能不太敏感，因此这个均衡吹气速度会是一个范围，而且范围大小因人而异。



所以，就定义均衡吹气速度需要“标准人”这个事来说，定义这个量还是不现实的，因为“标准人”是很难定义的。其实，人对温度的感受和环境密切相关，人的皮肤感受到的是热流密度而不是温度。热流密度和温差、传热系数密切相关。另外，风速对人体感受到的冷热影响可以很大。人在温度稍低且高风速的环境中比在温度更低且低风速的环境中更容易冻伤。



35.以导体传递电子信号，人们能做出电子计算机，那传统意义上的“机关”和现代意义上的机械结构能不能称为“力学计算机”呢？

题主的这个思考角度很有意思。确实，有一类能够实现一定的逻辑操作的机械可以看作广义的计算机。被尊为计算机科学之父的数学家图灵，就曾将现实中的计算过程抽象为数学上虚拟的机器模型，即大名鼎鼎的图灵机。图灵机包含四个关键组成部分：一条可依次记录有限种符号的无限长纸带，一个可来回移动并读写符号的探头，一套基于当前状态和符号确定读写头下一步动作的规则，一个记录机器当前状态的寄存器。

尽管公认的现代意义上的计算机直到1946年才诞生，但是早在1804年法国人约瑟夫·玛丽·雅卡尔（Joseph Marie Jacquard）发明的用于织造花纹布料的新式提花机中就已经用到了编程控制的思想和方法——根据要编制的图案在纸带上打孔，以孔的有无来控制经线与纬线的上下关系。1836年，英国数学家查尔斯·巴比奇（Charles Babbage）制造了木齿铁轮计算机，并利用雅卡尔穿孔纸带原理进行编程。IBM公司靠卖穿孔卡片制表系统起家，并于1935年开发出穿孔卡片式计算机。

当然，“机械式计算机”不只是以上这些古板枯燥的样子，其优雅与艺术性也足以让我们叹为观止。英国人送给清廷、现收藏于故宫博物院的青铜镀金写字人钟，利用具有凹凸槽的偏心铜转盘，通过巧妙的配置实现类似编程的功能，可以用毛笔工整地书写“八方向化，九土来王”八个汉字，非常有趣，快去搜个视频看看吧！



36.如果给地球钻一个经过地心的对穿孔，然后丢一个重物下去，这个重物最终会悬停在地心处吗？

我们知道，球壳内部任何一点来自球壳的总的万有引力为0（证明过程可以参考静电场的高斯定理），这样的话，一个实心球内部任意一点受到的万有引力可以分解为一个球壳和一个小的实心球提供的万有引力的合力（以该点到球心的线段为半径画一个球面，将实心球分为一个球壳和一个小实心球），显然球壳并不贡献万有引力，只剩下的小实心球贡献，方向指向圆心（其实读者可以试着将该点所受的万有引力的大小解析式写出来）。

现在，如果我们不考虑阻力的话（无能量耗散），将重物自由落到孔中，重物一旦开始受到指向球心的力，必将一直加速运动，直到到达球心，重物此时受到的合力为0，但依旧有速度，因此会继续沿着小孔运动，只是越过球心后受力依旧指向圆心，因此会做减速运动，根据机械能守恒我们知道，重物肯定能到达小孔的另一端出口，并且到达时速度为0。此时重物由于还是受到指向球心的万有引力，所以还是会往回运动，所以重物就会一直这样沿着隧道做往复的周期运动。但如果考虑阻力的话，重物的机械能沿途耗散，因此它最终会停在球心处（势能最低的点）。



37.为什么没有透明的金属？

关于透明不透明的问题，物理君可以讲上一年都不带重样的。时间有限篇幅有限，咱们这里就简单说明一两点吧。

适应一下物理学的节奏，我们首先来明确一下概念：透明和金属。金属好理解，这里按维基上的说法来，金属是一种具有光泽（对可见光强烈反射），富有延展性，容易导电，容易传热的物质。这或许不太严谨，那就来个稍微专业一点的，元素周期表上所有带金字旁的元素（外加汞）构成的物质是金属。金属有个性质就是有大量“全局共享”的“自由电子”。

啥是“透明”呢？这个词比较“意会”，咱们把它明确一下，就是透光。这里针对的是可见光。毕竟对于X射线之类，不透的物质还是比较少的。

为啥有的物质“透”，有的物质“不透”呢？宏观上几乎所有电磁波问题都可以用麦克斯韦的电磁波理论来解释。简单理解就是麦克斯韦方程组加上边界条件可以解出电磁波在介质中的传播方程。而与介质相关的量是电容率（介电常数）和磁导率。为啥有的介质透光呢？就是该材料的电容率和磁导率恰好能使麦氏方程有可见光波段的解，而不透光的介质没有可见光波段的解。

如果物理君只说这么多，然后告诉你就这么巧，金属恰恰满足这个光不能透过的条件，你是不是会很不服？！

那就再满足一下你的好奇心，稍微说一下电磁波在金属中传播的微观机制。这里涉及的专业知识就比较多了，要想彻底弄明白这个问题的同学最好报考物理学专业。我们就说几个专业名词来满足一下“高级”的追求好了。我们知道，金属中有很多“自由电子”是“全局共

享”的。而可见光在金属中不能传播，这主要是由这些个自由电子对电磁的响应特性造成的，这里涉及复杂的电磁相互作用，就不展开说了，其结论就是自由电子的电磁响应决定了金属对低于某一个频率的光子（可见光就在这个范围内）具有较强的反射率，这也是多数金属带有光泽的原因。



38.为什么高处比低处冷，越高不应该离太阳越近吗？

事实上，地球表面大气的温度并不完全随着高度的升高而降低，而是在不同的高度有不同的表现。以对流层和平流层为例，对流层内大气温度随高度的增加而降低，海拔每升高100米，温度约降低0.6摄氏度，而在平流层底部温度基本恒定，海拔超过20千米的部分温度随高度的增加而升高。原因在于，不同的区域大气获取热量的途径不同，阳光的辐射是所有大气共同的热量来源，这也给题主海拔越高阳光越强（并不是因为离太阳近，而是大气对阳光的吸收比较弱）从而温度越高的印象。不过对于大气层底部的空气来说，地面也会对其直接加热。

从近些年的报道来看，地表温度突破70摄氏度的城市并不少见，地表对空气的加热效应很明显，而海拔越高地表的加热效果越不明显，于是低海拔处温度高，高海拔处温度低。对于平流层的大气来说，地面的影响可以忽略，阳光辐射成为热量的唯一来源。随着海拔的升高，空气的臭氧含量升高，大气对紫外线的吸收增加，温度逐渐上升。



39.为什么镜像是左右颠倒，而不是上下颠倒的？

为了弄清这个问题，我们做一个简单的假设。假设在无重力的环境下，一面圆形的镜子前面站着一个“点”观察者，这个观察者会发现一个非常神奇的情况：它是不能区分上下左右的，既然如此，它也就无法区分镜子里的图像是左右相反还是上下相反。它唯一可以区分的方向，就是垂直于镜面的方向。假如镜子无限大，它甚至都不知道它是否有平行于镜面的运动！

我们人大约也是这样。当我们说镜像左右相反的时候，我们想象另一个自己绕镜面竖直中心线旋转 180° ，来到镜子后，我们将镜像与自己比较得出左右相反的结论。实际上，我们也可以将旋转轴放在水平中心线上，那样我们就能得出上下相反的结论了。所以，有没有什么简单的方法可以让镜像看起来上下颠倒呢？

可以试试对着镜子平躺嘛！



40.光照会对物体产生压力吗？如果会，为什么光不会砸死人？

从现代物理的角度来看，力并不是一个非常本质的概念，力的实质是动量在单位时间内的改变量，或者说是一种有动量转移的相互作用的表现形式。这一点在经典力学中就有一定的体现：力 $F=dP/dt$ 。因

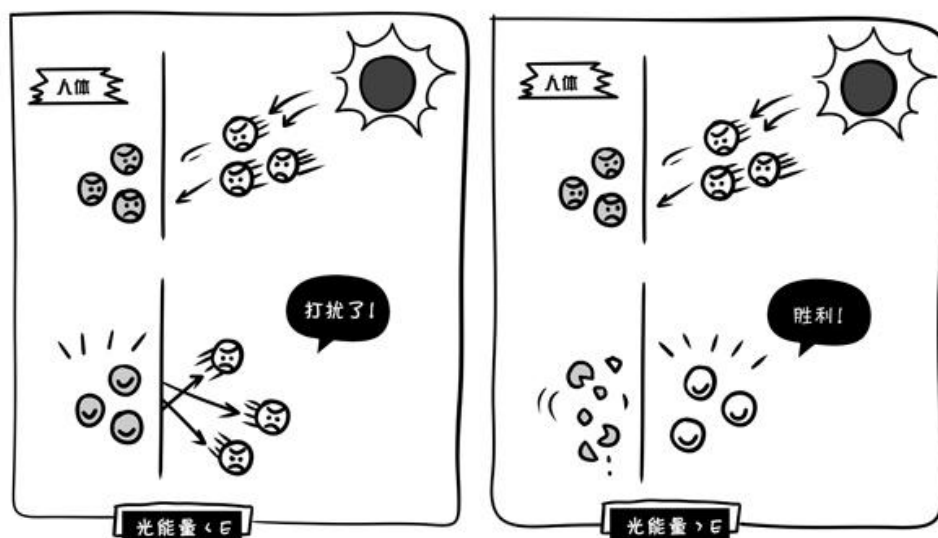
此要判断一个过程是否有力的“存在”，关键是要看这个过程是否存在动量的转移，或者说参与相互作用的双方是否有动量的改变。

说了这么大一堆，现在回到光照是否会对物体产生压力这个问题上来。从量子力学的角度来看，光实际上是电磁相互作用的传播者，名曰光子，携带一定的动量和能量。其（真空中）动量的大小正比于其能量，比例系数 c 为真空中光速。当光照射到物体上时，光会被吸收或者被反射，这两个过程都会使光子动量改变，因此被光照射的物体会受到力的作用。有人可能会问，我天天晒太阳，为什么没有感觉到光的压力？这是由于日常生活中的光产生的压力实在是太小了，在能把人热成狗的烈日下，你受到的光压强也仅仅是大气压强的千亿分之几（整个地球受到的太阳光光压大约有几万吨）。



日常生活中的光压小主要是因为光功率密度太小了。这里再举个大光压的例子：在人造光源中恐怕只有大功率激光能够产生较大的光压，不要说人，大功率激光可以在一瞬间让钢铁升华。但是这与恒星

内部的光压相比简直不值一提，比如太阳核心附近的光压大约是一亿亿倍大气压。



41.有一座独木桥极限承重100千克，小明体重80千克，拿着两个15千克的背包，有没有可能通过轮流抛接的方式过桥？

我们分析一下丢背包的过程，从你接住它起便要给它施加一个向上的力以使它先减速下降直至速度降为0，接着再加速上升。根据牛顿第三定律，此时背包也会施加给你一个向下的力，这个力需要桥给你额外的支持力去平衡，也就是说你会对桥有一个额外的压力。假设你施加给背包的是一个恒力 F ，从你接到它到它再次被抛起离开你手的这段时间为 t ，背包质量为 m ，则有： $(F - mg)t = 2mv$ 。

在这一过程发生时，另一个背包必须一直在空中，由于抛两个背包是相同的过程，所以时间 t 必须小于以初速度 v 竖直向上运动的背包

再次回到你手中的时间 $2v/g$ ，也就是——

$$t < (F - mg) t / mg$$

$$F > 2mg$$

也就是说，抛接并不能起到减小压力的作用。想通过轮流抛接的方法过桥可以这样做：先依次把两个背包抛过桥然后再过桥。

这个问题给了我们一个启示——好好减肥，别想没用的。



42.在赤道上建个太空电梯，一个人带着卫星坐电梯升到地球同步卫星轨道的高度，打开电梯门，轻轻地将卫星推出去，人会看到卫星静止地悬浮于门外成为一颗同步卫星，还是会看到卫星掉下去？

卫星不会掉下来是因为它做圆周运动时所需向心力正好和它所受的引力大小相等方向相同，也可以说此时万有引力正好充当了向心力，即：

$$G \frac{Mm}{r^2} = m\omega^2 r$$

地球同步卫星运动的周期与地球自转周期相同，那么由等式可知其必然与地球相距一个确定的距离。卫星的推进器做功不仅需要克服引力，还需要提供在轨道上运动的动能。我们假设真的可以造一个电梯把你送到太空。在这一过程中克服引力的功由上升的电梯提供。电梯升降通道是固定在赤道上的，所以整套电梯机械都在做和地球自转

周期相同的圆周运动。因此当你抱着卫星上去时， ω 和 r 的平衡条件达到了，它自然不会掉下去，所以你看它是静止的。事实上此时你也和它一样在做圆周运动，万有引力充当了向心力，所以你处于失重状态。



43.在火车静止的时候，在火车车厢半空中升起无人机，让无人机悬浮静止，然后火车发动，无人机会碰到车厢上吗？如果有相反的情况，在高速行驶的火车中，无人机悬浮在车厢中间，无人机会和火车速度同步吗？

我们先来分析下人坐在车里的情况：在火车启动时，座椅会对人施加一个推力，这个推力会把人往前加速，这样可以使人和火车一直保持一个同步的状态。对于悬浮在车厢中的无人机来说，火车在启动时相对于地面一直在加速，但是和人坐车不同的是，没有什么物体在推着无人机向前加速（空气的作用非常有限，可以忽略不计），所以火车相对于地面越来越快而无人机则一直悬浮在原处（相对于地面来说），结果就是无人机最终会撞到车厢上。

如果在火车匀速直线运动的过程中升起无人机，因为无人机原本就和火车具有相同的速度（无人机停在车厢里），所以升起过程中即便没有其他物体的推动，无人机仍然可以和火车保持相对静止（水平方向），这种情况下无人机就不会撞到车厢。但是如果火车在无人机升起后开始加速，这种情况下，无人机仍然会撞向车厢。



44.一定要有水才会有生命吗？难道不能有以其他资源为基础的生命？生命一定要出现在宜居带上吗？

这个问题很大，以目前的知识来看，我们没有答案。一方面我们还没有发现任何不含水的生命，但另一方面，也没有任何证据表明生命一定非要含水不可。

不过至少我能讲讲人类在寻找外星生命时总是先找水的理由。因为水作为地球生命的载体，是有着很多得天独厚的优点的。

第一，要维持生命，溶剂是至关重要的。有了溶剂，生物才可能发生新陈代谢，才可能吸收营养和排除废料。而比起其他溶剂，水是一种相当容易形成的分子，它的化学结构简单，只由氢和氧组成，分别是宇宙含量第一和第三的元素。

第二，水的溶沸点分别为0摄氏度和100摄氏度，这个温度区间恰好是大多数有机分子可以参与反应而又不至于结构被破坏的温度区间，是有机分子发生反应的理想环境。

第三，水有着反常的高比热容，要蒸发1千克的水需要消耗接近600千卡的热量！这使得以水作为载体的生命对外界温度的变化有着更强的抵抗能力。

第四，水有着很大的表面张力（室温下只输给水银），这可以极大地帮助有机分子聚集，帮助生命演化。

第五，……

暂时想到这么多。



45.为什么光可以用东西挡住，声音却不可以？

其实声音也是可以用东西挡住的，光也可以不被东西挡住。你问题中的光指的是我们能够看见的可见光，你问题中的声音也只是可以听到的声音。

在物理上，光和声音都是一种波动现象。只不过一个叫电磁波，一个叫机械波而已。而决定一个波会不会被一个东西挡住的因素很简单：波长的尺度与物体的尺度。如果波长远小于物体的尺度，那么这样的波就会被物体挡住。反之则不会。

人能够听到的声音的波长在17毫米到17米这样一个尺度范围内。日常生活中的绝大多数东西也恰好都在这个尺度范围内。结果就是声波很容易绕过这些物体被我们听到。这种现象就叫衍射。

另一方面，可见光波长的数量级只有几百个纳米，这个尺度远远小于日常生活中物体的尺度。所以光看上去几乎就是直线传播的。

问题的关键不是光或者声音，而是波长。声波波长很短时就不能绕开物体了，超声波就是准直线传播的声波。同样，波长长的光波/电磁波也可以绕开物体。这就是你在家到处都能收到Wi-Fi信号的原因。

（Wi-Fi信号是电磁波，2.4GHz协议，它的波长差不多就跟你的脸一样宽。）



46.根据热力学第二定律，世界将越来越混乱。那为什么会产生能体现秩序的细胞、生物和人类？

“世界”一词有两种理解方式，一种立足于全宇宙，一种立足于地球，即我们生活的世界。

热力学第二定律表明，孤立系统的熵值是不断增加的。站在第一种角度看，这个问题即是著名的“热寂”理论。站在第二种角度看，这个问题就变得复杂了，因为地球不是一个孤立系统，它每时每刻在与外界进行物质能量交换。对于非孤立系统，热力学第二定律不能简单适用，因此我们不能直接得出“世界将逐步更加混乱”的结论。

事实是，生命的出现对于我们生活的狭义的世界来说确实是更有“秩序”的，然而对于广义的世界即整个宇宙来说，它仍然会使“世界更加混乱”。生物体为了维持生命，即维持一种远离热力学平衡态的“秩序”，必须不断向体内注入“高秩序”的低熵食物，并排出“低秩序”的高熵产物，才能平衡体内不断发生的不可逆的熵增过程，表现出“活力”。也就是说，生命创造出来的局部“秩序”是以不断牺牲生命系统之外的“秩序”为代价的。对于宏观的生态系统来说，最初的“食物”主要来自太阳的电磁辐射（以可见光为主），绿色植物通过光合作用可以对它们加以利用。而最终的“产物”包括两部分，一大部分是所有生物因呼吸作用而产生的热辐射（以红外线为主），比如人体的37摄氏度体温辐射；另一小部分则是远古动植物尸体转化成的各种化石燃料。整体上看，这是一个熵增的过程，因为根据黑体辐射理论，等

量红外热辐射的熵远大于等量可见光热辐射的熵（虽然它们不是严格的黑体辐射，但定性的结论不会改变），而化石燃料的熵则介于这两者之间，因此生命的出现并没有违背热力学第二定律。

学习篇

01.基本的物理常识有哪些？

简单的物理常识有很多（牛顿定律啊，热力学定律啊，等等），但物理君觉得最重要的是这三条：

（1）物理是一个以实验为基准的实证学科，不是一门光靠空想和思辨的“哲学”。

（2）物理不是真理。

（3）但物理更接近真理。



02.在学习物理的过程中最应该重视的是什么？

脚踏实地。不要天天想着宇宙啊，量子力学啊，相对论啊，这些看起来很“酷”的知识，而不屑于思考牛顿力学和生活中常见的现象。首先，相对论没有那么难；其次，牛顿力学没有那么简单。



03.物理公式太多了，都要记住吗？

哈哈哈哈！同学，就算把公式全部背下来，你也不一定学会了物理。一般来说，比较好的办法是：（1）找出最基本的几个公式；（2）推导出其他所有的公式——这个办法不但不用记，还能检验你是不是真的把物理学懂了。



04.不用数学公式，只靠语言描述，能使一个智力正常但不懂数学的人理解物理吗？

一般我们认为，真正的物理大师可以不用数学公式，只靠语言描述清楚物理图像。但物理是离不开数学的。我们认为不用数学公式讲清楚物理的第一步，就是用数学公式讲清楚物理。

同时，我们认为不用数学公式讲清楚物理的必要非充分条件是讲者与听者都会用数学公式讲清楚物理。



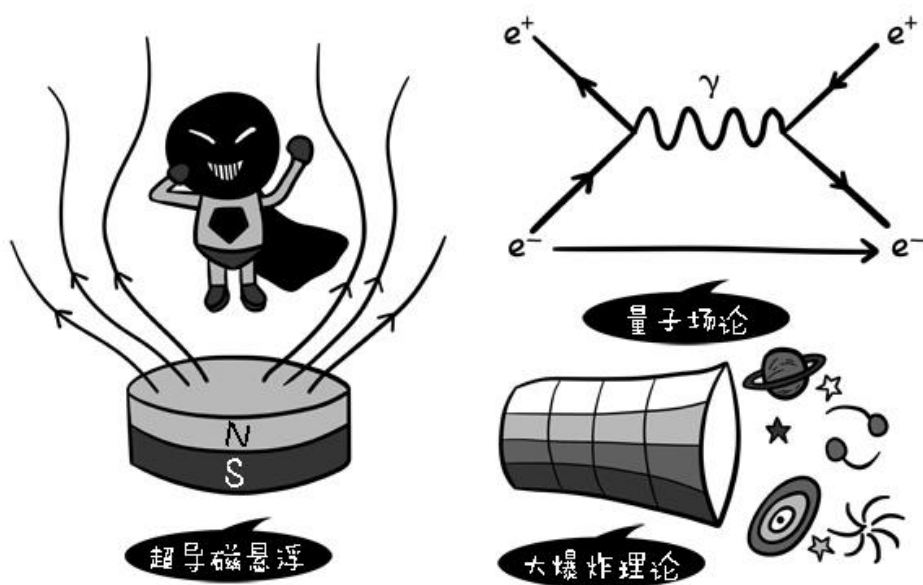
05.现在物理学研究领域最具活力和发展前景的内容有哪些？

这个问题就好像问一大群淘金者：真正的大金矿在哪里？看起来似乎每一个人都知道，其实每一个人都不知道。

不过我们仍然可以给你一个建议：跟着自己的兴趣走，follow your heart!



06.基础物理在最近百年几乎没有根本性的突破和飞跃，现在的条件好得多了，但是科学家仍旧在验证以往的成果（比如引力波）。物理学就是在等待天才吗？



基础物理近百年的突破挺多的，包括量子场论、QED、非阿贝尔规范场论、QCD、标准模型、弦理论、超对称、超弦、暴涨理论、朗道相变理论、朗道费米液体理论、超导BCS理论、超流、拓扑绝缘体、量子霍尔效应.....不过都超纲了（物理君露出了微笑）。



07.上大学学习物理能干什么？以后有什么用？

这是一个非常有价值的问题！大学物理系的第一批专业课叫普通物理，包括力学、热学、电磁学、光学、原子物理学五门课。在这个阶段，你会学到大量的物理现象，以及根据这些现象总结归纳出来的大量公式。这个阶段的物理是以现象为主的，或者是“唯象的”。这种从实验现象不断抽象出物理公式的训练过程，是最能培养物理图像的。

接下来，你会上升到一个更高的等级，开始学习四大力学，包括理论力学、电动力学、量子力学和热力学统计力学四门课。与基于现象归纳的唯象理论不同，你在这一阶段学习的物理是基于数学演绎的形式理论。也就是说，这时候的理论是从几个基本假设或者基本公式出发（比如麦克斯韦方程组），用数学推导得到以前学习过的所有的实验现象。以前的理论是基于实验的，现在实验是基于理论的。从归纳到演绎的升华过程中，理论变得更加严格的同时，也获得了预言实验的能力。到这个阶段，你一定会发现以前学过的数学（微积分线性代数概率统计）根本不够用了，所以你会学习一门数学物理方法。

（一些数理要求高的学校会把这门课分成复变函数论和微分方程两门课。）

四大力学学完再往上走，你会发现数学又不够用了。不过这时候路就不止一条了，根据你选的方向，粒子物理啊，凝聚态物理啊，天体物理宇宙学啊，遇到了问题再学需要的数学就是了，比如李群、微分几何、代数拓扑，等等。

最后一个问题：学物理能干什么？大学物理系的教育初衷是为研究系统输送后备人才。但学物理能做的事比研究多多了。物理专业在大学各个专业中学习难度一级高，物理系四年近乎苛刻的数理训练才是你得到的最宝贵的东西。这能让你在绝大多数工作中迅速上手，并且游刃有余。



08.电动力学讲了什么？

电动力学是电磁学的高级课程。如果电磁学只是一堆实验的堆砌，那么电动力学就是数学成分更多的形式理论。它会从几个简单的方程出发，用数学推导出电磁学中的所有实验现象，顺便把相对论协变形式也讲了。

一个很好玩的问题是，为什么电磁学的高级课程叫电动力学而不是高等电磁学？因为电动力学会教你，电动起来就是磁了！哈哈！



09.作为物理学家，你如何看待化学和物理的关系？我是学化学的，我发现身边不少学物理的人觉得化学是物理的一个分支，他们认为学物理的人必然了解化学，但是学化学的人却无法理解物理。我觉得化学和物理息息相关，但是对于问题的着手点和研究方向大为不同，在现实中的应用也大为不同，物理和化学不是父子，而是兄弟。你怎么看？

哇，一个物理学家要回答物理和化学谁更重要。要我说当然是物理了。（隔壁的数学家们是不是要表示一下情绪稳定？）

看到你的问题，我默默地翻开了自己这些年看过和想看的化学书。回想兄弟当年在英国的时候，听说学校的有机化学课很有名，特意去旁听有机化学导论，结果很痛苦……就我个人的失败经历来说，“学物理的必定会化学，学化学的无法理解物理”是不成立的。

从学术传承上讲，我的祖师爷是个有名的物理化学家，他的物理功底许多知名的物理学家也未必比得上。

科学追求世界的本原问题，这种追求来源于人的好奇心和探索精神。幸运的是，我们发现自然规律都建立在质能守恒、动量守恒、熵增原理、电荷守恒、电磁理论、力场理论、薛定谔方程、海森堡测不准原理、泡利不相容原理、对称定律等基础原则上。这些原则构成了我们认识世界运行的基础。在这些基础上，物理学家更关注物质内在的性质和物质为什么有这些性质。而化学家更关注物质的转化和如何转化。热力学和量子力学是现代化学必教内容，但就像“条条大路通罗马”并不能解释“人们为什么总走这条路”或者“人们为什么不走向米兰”一样，物理不能代替化学，反之亦然。作为一个热爱科学的化学家，这位读者没必要纠结谁是谁的父亲这样的问题（说起来化学的历史可是悠久得多）。这并不能帮助你收获更多。畅游在科学的海洋里，偶尔获得前人没有发现的知识，利用新知推动社会的发展，这难道还不够让人高兴吗？



10.完备的物理理论体系在数学上是严格的吗？

物理君不知道如何回答，因为不知道“完备”是什么意思。也许“物理理论体系在数学上是严格的吗”是个恰当的话题。

从物理学的本质来说，它包含太多数学不拥有的因素，比如观察、测量、原理假设、模型构造甚至幻想，因此它天然地很难具有数学意义上的严格性。好的物理理论当然追求数学上的严格性，但能做到什么程度则各有不同。

具有较高数学严格性的物理理论样本包括基于麦克斯韦方程组的电磁学和热力学。从麦克斯韦方程组到电磁场波动方程再到规范场论，数学上是相当严格的；而热力学，从卡诺的纯粹定性思维发展到卡拉泰奥多里的公理化描述，算是具有了相当严格的数学形式。熵的引入具有数学严格性，热力学第二定律的卡拉泰奥多里表述也是很数学化的：对于具有任意多的力学量的热力学体系，Pfaffian form $TdS + Y_i dX_i$ 一定是全微分。

大部分物理理论只是部分具有某些数学严格性。典型的例子就是广义相对论。爱因斯坦得到引力方程的过程就谈不上数学严格性，从弱场近似写出张量形式的场方程以及宇宙常数的增删相当率性随意，我们称之为构造而非推导。从引力场方程出发得到Schwarzschild解和Kerr解是具有数学严格性的。而爱因斯坦自己从引力场方程得到所谓的引力波方程，以及后来人们以Schwarzschild解引出的黑洞概念为基础，计算黑洞融合激发的引力波在光电倍增管上会产生怎样的振荡信号，这就实在谈不上什么数学严格性了。



11.学习相对论要有什么知识储备？

狭义相对论不需要什么基础，学过中学物理就能自学了（并不指望你精通）。学习广义相对论要先学微分几何。



12.国外有哪些优秀的科普网站？

这里推荐通俗性和科普性比较强的三个网站（相较科技新闻类的网站，这三个网站整体水平都很高，尤其是Nautil）：

（1）Nautil: <http://nautil.us/>;

（2）ScienceAlert: <http://www.sciencealert.com/>;

（3）IFLscience: <http://www.iflscience.com/>。

还有一些偏新闻类的网站，以前沿科学或科技进展为主要内容（其实这一类的实在太多了）：

（ 1 ） 《 科 学 美 国 人 》 杂 志 官 网 ：
<http://www.scientificamerican.com/>;

（2）Science X的物理学频道: <http://phys.org/>;

（3）EurekAlert: <http://www.eurekalert.org/>。

再学术一点的就是期刊类网站了。

最后扔一个帖子，大家可以去看看外国人自己推荐的最受欢迎的Top15科普网站：<http://www.ebizmba.com/articles/science-websites>。

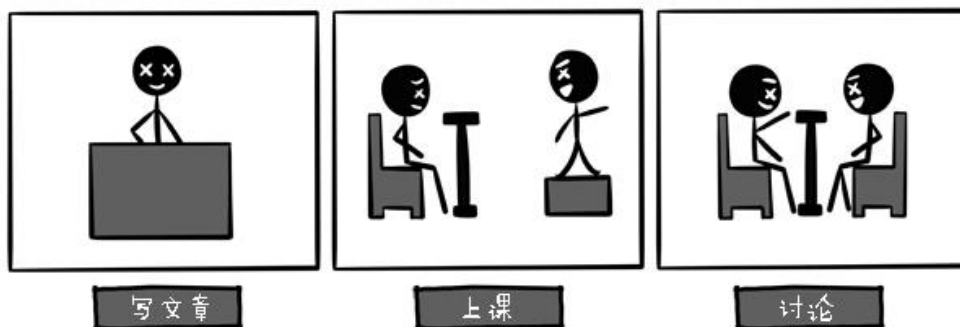


13.科技在不断地迅速发展，怎样才能让科技大众化，而不是专门化？

本来就不应该让科技大众化，强行把科技大众化是反智的，只会带来大量的谬误和曲解。科技就是科技，科技就应该专业化。我们的科普也是专业化的，科普的目的不是让科技变得大众化，而是尽量让大众一起专业化一些。



14.物理学家们平时都在干什么呢？泡实验室？疯狂计算？还是45°仰望天空呢？



做实验，写代码，推公式，买仪器，搭仪器，申报仪器，报账，上课，讨论，辅导学生，参加组会，参加学术会议，组织学术会议，访问交流，申基金，搜文章，看文章，写文章，投文章，审文章.....



15.量子力学该怎么学？

方法不唯一。我们一般推荐从矩阵力学入手，先理解量子力学的整体理论框架，然后再去解连续的薛定谔波动方程。把量子力学学成偏微分方程练习就错了，把量子力学学成线性代数练习就对了。第一遍学遇到物理上无法理解违反直觉的东西，应该先接受，以能算出东西为主。学完一遍之后再去思考它那些违反直觉的物理意义。



16.在应试环境中，想当科学家的孩子该如何更好更早地培养自己的科学素质，而不变成“民科”，也不影响学业？

还是那句话，脚踏实地。一步一步地来，先自己弄完大纲内的中学理科课程，大纲内的中学理科课程做到没有挑战性的时候可以看竞赛课程和通选类的大学课本（比如高等数学、大学物理），网上的大学低年级公开课视频是可以借鉴的。一些优秀的科普书是很有帮助的，课余时间值得一看。至于哪些科普书是优秀的，如果自己没有甄别能力，尽量选作者头衔是科学家的。这样虽然会错过不少优秀的书

籍，但至少不会被带歪。（“第一推动丛书”整体都还不错，可惜难度不一。）

不成为“民科”很简单，那就是多看数学，多思考枯燥的公式，学会欣赏公式背后的逻辑和结构的美。不要空谈或者凭自己的想象随意使用“高大上”的概念，不要成为名词党。



17.如何高端地用物理撩妹/撩汉？

等你真的把物理学进去，开始欣赏里头的一些思想时，你就会发现：这些感受很难说出来，很难与人分享，很少能与人共鸣。这东西就跟做梦一样，绝大多数时候只能一个人体会。所以，物理可能是一个会让人稍微孤独一点点的学科。不过适当的孤独不见得是坏事。

当然，如果你不甘心，一定要用物理来强行撩妹/撩汉，相信我，你会变得更孤独。

思考题：物理君是怎么知道的？



18.为什么很多物理理论都违背我们的直觉？如果物理学描述的是我们生活的世界，那应该符合我们直觉才对啊。

爱因斯坦说过：“常识就是人在十八岁之前累积的偏见。”

任何知识学到深处你都会发现，日常生活中能够接触到的那点东西狭隘、渺小得可怜，像井底的天空——的确，任何知识，不管是物理定律、文学、绘画，还是音乐。它们都诞生于人类对日常生活的思考和总结。但最终，相对论不在意低速运动的生活常识了，马尔克斯不再坚持刻板的真实描写了，毕加索开始在扭曲和疯狂中探索了，日常生活被超越了。如若不然便没有意义。这些东西是把你带出井底的工具。

所以，正确的方式只能是不断地用知识来更新以前的常识，而不是相反。认为知识应该符合常识实在是一种既偷懒又自以为是的危险想法。



19.如何认识数理化的相互联系和地位？

数学、物理、化学都是自然科学的基础学科。但从特点上说，数学是一种先验的哲学，是一种“可证明的形而上学”。所以从某种程度上说，它并不是自然科学。数学的命题一旦证明就绝无推翻的可能。物理学是自然科学的重要基础。物理的理论需要依托对现象的解释，不能完全脱离“人的经验”。正确的物理理论不存在证明了与否，只关注与现象的符合程度。而化学从某种程度上来说，是层展现象引发的“唯象物理”。所谓层展现象就是随着基本粒子聚集层次的增加会出现很多难以理解的新现象。但是，化学绝不是应用物理学或应用多体物理学，而是在化学本身的层次上研究其自身的规律，在这个层次的研究中需要的创造力不亚于前一个。比如，计算机的发展让我们能够

模拟很多复杂的化学过程，但是计算机能做的依然有限，一些问题不是单纯依靠计算能力的提升就可以解决的。如果我们能从原子、分子的尺度建立足够有说服力的唯象理论，并结合实验去研究该结构层次的现象，又相对不那么费力，何乐而不为呢？

物理君总结了下面三点事实：

（1）研究物理和化学都离不开数学。

（2）数学家的现代生活离不开古往今来所有数学家、物理学家和化学家的研究成果。

（3）优秀的数学家、物理学家和化学家一般都没有时间去嘲弄其他两个领域的优秀成果。



20.专门从事物理学史的研究对物理学的发展来说是否多此一举？

兄弟，托马斯·塞缪尔·库恩（Thomas Samuel Kuhn）第一个表示不服。详情请看他写的《科学革命的结构》（*The Structure of Scientific Revolution*）。

21.为什么我考试成绩不错，却还是觉得没有学好物理专业课，甚至觉得课本里的知识很奇怪？物理系学生该怎样加深自己对课本的理

解？“读书百遍，其义自见”对学习物理适用吗？

能够意识到这一点是很好的。举个例子，在物理学里，四大力学代表的是四种世界观。本科阶段能熟练掌握一门也不见得容易。考试成绩只考虑有限课时情况下的合理要求，考试成绩不错，并不代表四大力学你真的掌握了。有困惑很正常，而且能够发现一些“很奇怪”的地方说明你学得不错。有一些困惑涉及的东西相当深，没有办法放到本科的教学计划中去，所以建议是不要在这里“死抠”，带着问题继续往前走，等学到更高的层次后再倒回来看，你会有新的体会。常看常新。



22.怎样透彻地学习大学物理？

个人之见，关键在于两个能力：物理图像和数学水平。前者要靠大量计算、广泛阅读和很多下意识的思考。后者要靠大量的计算、做题，以及对数字的敏感和熟练。另外，物理系课程之间的联系千丝万缕，不要把任何一门课当成一门孤立的课来学习。要花大量时间来融会贯通。总之前面这些就三个字：堆时间。

最后就是心态要好，上面这些都能做到的凤毛麟角，做不到也不必气馁。



23.我们现在已知的定理或者观念会不会是错的呢？很多很多年以后，无论人类文明以什么形式存在，科学探究会有穷尽的那天吗？

历史上被物理学界公认的理论几乎没有后来被证明是错误的。这是因为，要证明一个公认的理论是错误的，你必须同时推翻无数个支撑这个理论的实验事实。这根本不可能办到。很多同学经常用牛顿力学举例，但牛顿力学其实并没有错，它只是不够精确罢了。相对论和量子力学也没有推翻牛顿力学，它们只是给牛顿力学划定了一个适用范围，而当具体的物理现象落入旧理论的适用范围时，新理论必须无条件地重复旧理论的预言。所以只要物理理论仍然建立在实验的基础之上，那么现在的理论在未来也不会被完全推翻。

至于第二个问题，物理学家们已经不止一次觉得自己穷尽自然的一切奥秘了，然后就是被自然飞快地打脸教做人.....



24.光速究竟为何方神圣，为啥又是速度上限，平方以后乘以质量还能得到能量，就连新发现的引力波也是光速传播，这些都是巧合，还是有什么更深刻的原因？

光并没有什么特殊的啊。光子也只是一个没有质量的平凡粒子而已。与其说光速特殊，不如说无质量粒子的速度特殊。宇宙有个极限速度，这个速度就是无质量粒子运动的速度，所有有质量的粒子的速度必须小于它。所以，这里并没有什么巧合，引力波光速传播，只不过是因为我们认为引力子也没有质量。



25.力有传播速度吗？

有的，机械力的速度就是材料中声音的传播速度，比如声音在钢中的传播速度是五六千米每秒。如果是真空中传播的力比如电磁力和引力，那么其传播速度为光速。

26.磁场与电场本质上到底有什么联系？

在相对论的高度上讲，磁场和电场就是同一个东西，或者说得严格一些，是同一个物理量（电磁场张量）的不同分量。这意味着磁场和电场在不同的参考系下是可以相互转化的。事实正是如此，在以不同速度运动的惯性参考系中，你看到的磁场和电场可以不一样，但它们总的电磁场张量一定一样。而麦克斯韦方程组反映的其实是保证这种转化不出现bug（比如能量不守恒啊，动量不守恒啊）的几何结构。

继续深入下去，我们可以用纯几何的语言重写电磁学，电磁场可以定义成一个被称为纤维丛的几何结构，磁场和电场反映了这个几何结构的曲率。



27.电磁转换中有左手定则和右手定则，大自然为什么要选定这样的方向？如果有个宇宙这两个判定方向是和我们颠倒过来，违背什么更基础的物理定律了吗？

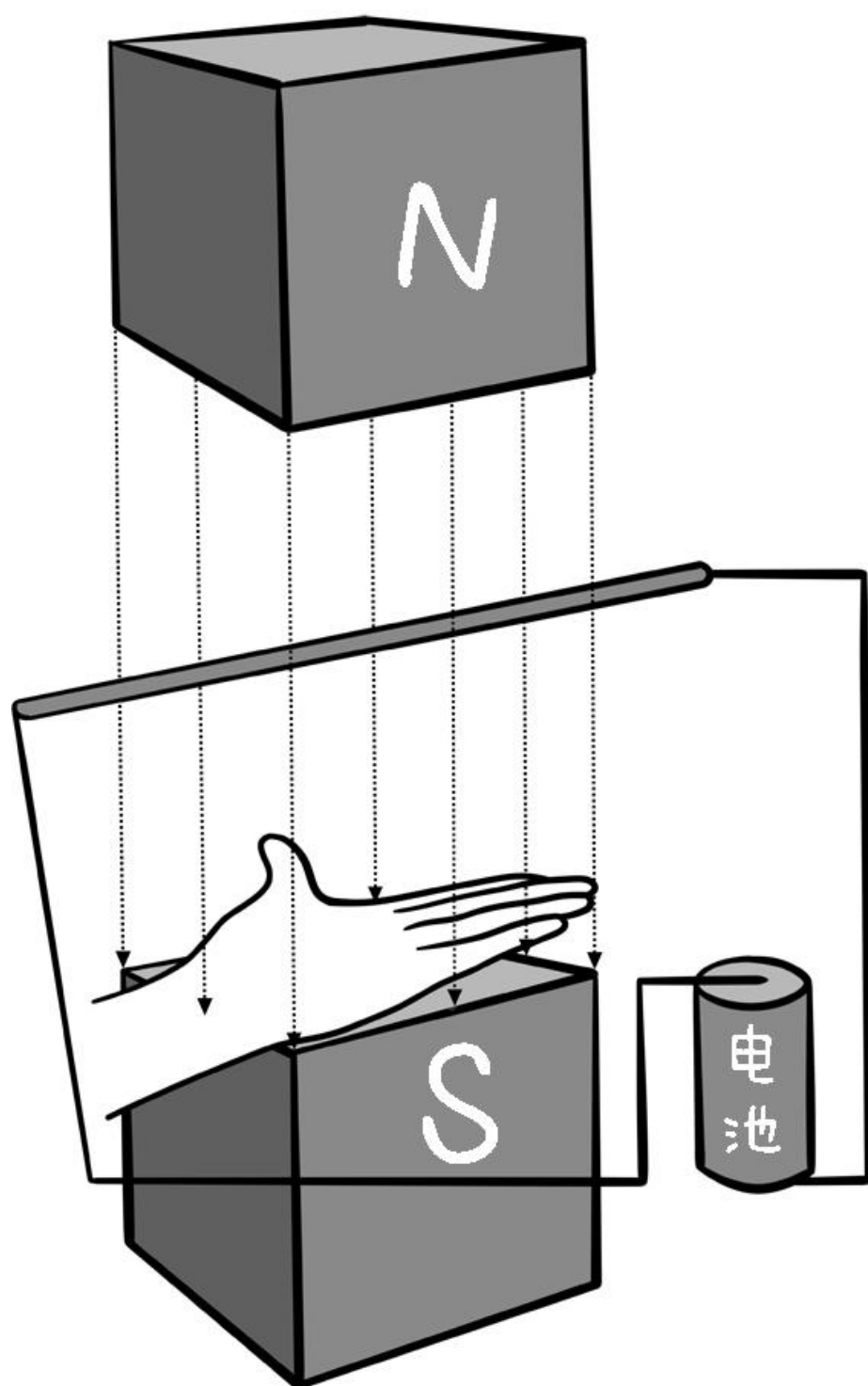
这个问题说着说着就要扯到宇称了。

左手定则和右手定则其实最开始是人为选择的。换句话说，如果你把所有的左手定则全部换成右手定则，同时把所有的右手定则换成左手定则，你会发现，除了看不见摸不着的磁场方向转了个 180° 以外，任何可以直接观察的物理现象都不会变。

举个例子：电子在磁场中做洛伦兹运动，磁场转了 180° ，看起来电子的洛伦兹力的方向也要变化 180° ，于是电子的运动轨迹也要变。但其实这里我们把判断洛伦兹力方向的左手定则换成了右手定则，又多了个 180° ，所以电子的运动没有受到任何影响。

在电磁学理论的范畴，物理学是没有能力判断左右的，左手和右手完全等价。习惯用的左手定则和右手定则也只是习惯而已，可以互换（但注意一定要一起换）。这就叫作宇称守恒。

前面特地强调了电磁学范畴，因为后来杨振宁和李政道先生在理论上证明了弱相互作用宇称不守恒，可以区分左右。这一点随后被吴健雄女士通过实验证实。





28.为什么不同的色光在同种介质中绝对折射率不同？在微观上波长如何影响折射？

光是电磁波，入射到介质中会改变原子中电子的运动状态，材料中被扰动的电荷将发射同一个频率但相位有延迟的电磁波，出来的光将是这些电磁波的总和，频率一样但光速变慢了，即折射率变大了。

不同频率的光对电子的影响不同，所以折射率与入射频率有关。在介质中，光的波长实际上变短了，但回到空气中还会恢复原来的值。频率是电磁波的本质而非波长，但通常在空气中这两个词可互换。折射率是介质的固有性质，和它的成分、结构有关，每一种介质对不同颜色的光有不同的反应，所以我们说折射率是频率（波长）的函数，即与波长有关，但不能说微观上波长影响了折射。另外，在有特定结构的介质中如某些晶体，折射率可能与电磁波的偏振方向有关。

还有，如果入射光特别强，对原子产生激烈的扰动，那么有可能发生其他一些变化，比如产生不同颜色的光，介质发热和结构变化使得折射率改变，甚至介质被破坏。这些属于非线性光学现象，有兴趣的朋友可以以后再学！



29.摩擦力的示意图是画接触面上还是画中心处？如果画接触面和二力平衡的条件又不相符，如果画中心处和力的作用点也不符，怎么解决？

应该画在接触面上。在这里，摩擦力和拉力就是无法平衡的。在摩擦力的作用下，木块有旋转的倾向。（这也是刹车时汽车车头总是会往下铲的原因。）当然，它没有真的旋转起来是因为地面挡着它呢，具体体现在前半部的地面支持力会大于后半部的地面支持力，给出一个反向力矩抵消旋转。



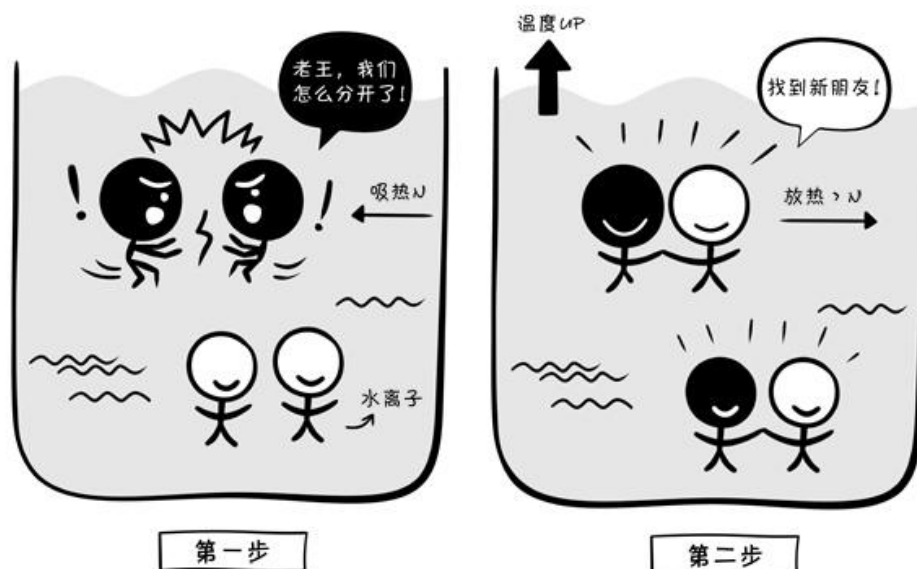
30.温度升高，氢氧化钙在水中的溶解度降低，而不是像大多数物质那样增大，这是为什么？

这个问题要分两步解答。

我们先说说为什么大多数物质溶于水会放热。物质溶于水时有两个过程，先是物质内部的化学键或分子间力被拉开，这一步要吸收热量。然后是被拉开的物质离子或分子与水或水离子重新结合，这一步要放出热量。大多数溶于水的物质，第二步与水结合时释放的能量要大于第一步拆散该物质原有结构吸收的能量。所以最终结果是系统总的化学能变低，因此溶解过程可以自发发生。系统放热，温度升高。

但有一小部分像氢氧化钙这样的物质，它们与水结合释放的能量要小于拆散原有结构吸收的能量。但它们的溶解过程居然也能自发发生，即使温度会降低。这是为什么呢？

原因是，氢氧化钙溶液的状态比固态的氢氧化钙加上纯水的状态要杂乱得多。换句话说，氢氧化钙溶液的熵高得多。因此，虽然氢氧化钙溶于水这个过程总的化学能是升高的，但由于熵增，总的自由能还是减少的，这使得这个过程能自发发生。这是一个熵驱动的过程。



31.“场”到底是什么？“力”到底是什么？能否详细说说它们的本质？

物理不是哲学。场也好，力也好，没有所谓的“本质”的结构。它的结构是人类按照描述自然的需求自己定义的。

比如场，最早就是把一个空间中的每一点都映射到一个数或者一个矢量、张量的连续映射，后来引入了量子化，场在空间的每个点成了一个算符。再比如力，最早作为一种“导致物体运动变化”的作用引

入。后来随着理论的发展，力变得越来越不好用，于是干脆打入冷宫不要了。

我们定义一种数学结构，如果它可以很好地描述实验现象，那便是好的。如果不能，那就打入冷宫，换个别的定义。所以，物理不是哲学。严格地说，物理学家不关心什么叫所谓的“本质”。物理学家关心的是通过这个实验看到了什么，这个实验怎么解释，这个解释能不能正确预测接下来的观测结果。一切以可观测对象为中心，不依赖于观测讨论“本质”或许只是“empty talk”（空谈）。



32.为什么同一种元素的不同离子在水溶液中颜色不一样？

离子之所以显现色彩，是因为它们允许特定能量的电子跃迁、吸收特定频率的光，且该频率恰好处在可见光范围内。

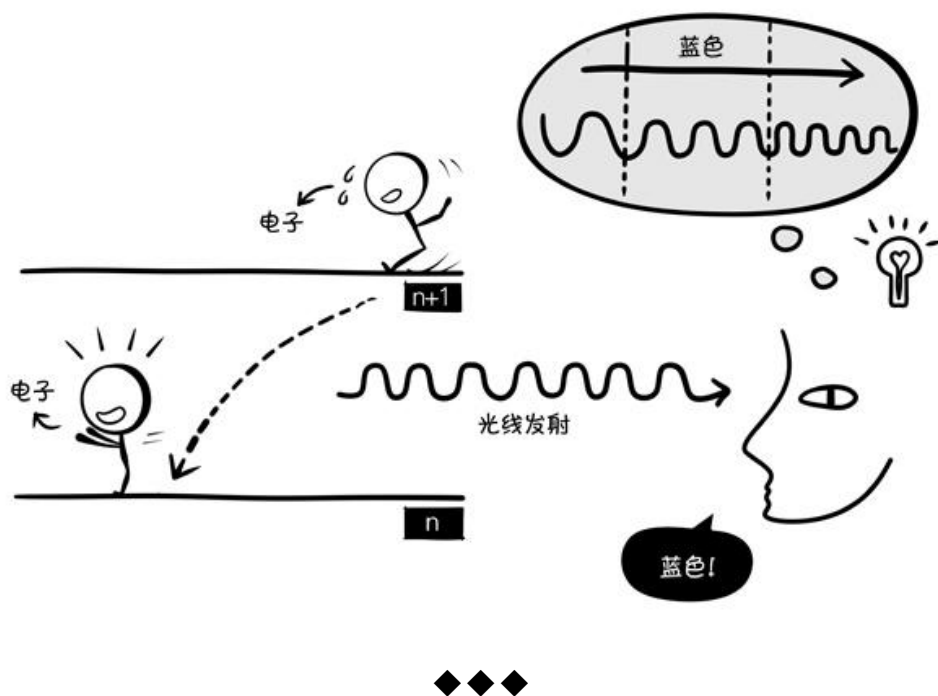
裸离子在溶液中容易与 H_2O 及其他分子或离子形成配合离子。以 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 的水合离子为例，这里有3个蝴蝶状轨道（ d_{xy} ， d_{xz} ， d_{yz} ），1个花生状轨道（ d_{z^2} ），1个饼状轨道（ $d_{x^2-y^2}$ ），6个水分子以八面体形式包围了中心的铁离子，这样会带来怎样的结果呢？

3个蝴蝶状轨道所处的几何环境相同，其电荷分布密集区巧妙地避开了周围的 H_2O 分子，相安无事地插在了间隙位置，从而具有较低的能量。花生状轨道的两头、饼状轨道的外围却与 H_2O 分子头碰头，相互排斥，从而具有较高的能量。最终，5个d轨道发生能级分裂，成为

高低两组，能量差恰好处在可见光范围内，电子在两组d轨道间跃迁产生颜色。

同种元素的不同离子，电荷越高则分裂能越大，产生的颜色会有所不同。 Fe^{2+} 对应的分裂能较小，吸收的光子能量相对较低，处在红光区，故显现与其互补的浅绿色。 Fe^{3+} 对应的分裂能稍大，吸收的光子能量相对较高，处在橙黄光区，故显现与其互补的浅紫色。

另外，溶液中的其他离子也可替换部分 H_2O 分子与中心离子配合，且影响分裂能的大小，引起颜色变化。比如在溶液 $\text{pH} > 1$ 时， $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ 的2个 H_2O 被 OH^- 替换，并发生二聚化，颜色从浅紫色变为黄棕色、红棕色。而在 FeCl_3 溶液中，4个水分子被 Cl^- 离子替换，形成 $\text{FeCl}_4(\text{H}_2\text{O})_2^-$ ，显现黄色。



33.显微镜拍的原子图片就是一个小球，真的原子就是这样的吗？

不是这样的，你之所以看到一个一个小球只是因为我们显微镜的分辨极限只能到这个程度了。举个例子，如果你给很远的人拍照，那么照片放大后，你会发现这个人的脸变成了一个个马赛克方块，这当然不是因为那个人的脸真的是方块。



34.为什么万有引力定律和库仑定律中力和距离是平方反比关系？这暗示了什么吗？

两者的原理差不多，就以库仑定律为例解释一下吧。因为在三维空间中球的表面积与半径的平方成正比，所以只有让电场强度（你可以直观地理解为电场线分布的密度）随电荷的距离成平方反比关系，才能够保证以电荷为中心的任意大的球上的电场线“根数”都是相同的，否则就会有电荷以外的地方“放出”或者“吸收”电场线了。换句话说，平方反比关系保证了电荷是电场唯一的“源”。从另一个角度理解，是我们生活在三维空间中才使得库仑定律中力和距离有了平方反比的关系。万有引力定律与之类似。

当然这只是经典的理解。据说在量子电动力学中，平方反比律与光子静止质量为零相关。然而在广义相对论中，如果时空弯曲得厉害，那么万有引力定律和库仑定律的平方反比律都不一定严格成立了。因此，有些物理学家正在研究距离很小或者很大时万有引力定律是否需要修正。



35.半径为 R 的带电金属球，其周围电场的能量与 R 的4次方成反比。那么当 R 趋于0时，能量趋于无穷大，这怎么解释？

这个问题也是困扰了物理学家多年的问题。

当时的问题是这样的：这个带电小球变成了质子、电子，按照点粒子的思想，电子被视为一个点，周围电场的能量是无穷大的。这样的答案显然是错误的，于是，物理学家想到了两种方法：重整化和弦理论。从使用上来说，重整化比弦理论简单很多，物理学家最开始使用的是重整化的方法。重整化的方法的显著缺陷是：这是一种妥协的方法——它认为质子由夸克构成，那么显然质子有了大小，不存在这个问题，但是这个问题没有被解决，而是推给了夸克。当然，现在这个问题已经留给了弦理论，所以也就不存在半径趋于0的带电小球了。

该答案源于大栗博司所著《超弦理论——探寻时间、空间和宇宙的本源》。



36.为什么真空中光速大于其他介质中的光速？

我们知道，光就是电磁波，电磁波会对电荷产生作用。介质中存在带电的电子和原子核，光通过介质时会对这些粒子产生作用。我们又知道，带电粒子在往复运动的过程中会发射电磁波，和原始光场相

互叠加，在最终的表观效果上显现出变慢的光速。注意，无论是原始光场还是诱导的光场，其传播的速度都是真空中的光速，光速变慢是一种表观等效。



37.动摩擦系数为什么不能大于1？

这个可能是种误导：中学物理课给出的动摩擦系数都小于1，其他很多例子里提到的动摩擦系数也都小于1。但现实中存在动摩擦因数大于1的材料。

实验测得金属与橡皮之间的动摩擦因数介于1和4之间，铟之间的动摩擦因数介于1.5和2之间，金属经过一定的处理（加压、加热、去除表面污物）后，动摩擦因数可能介于5和6之间。

多数学者认为，摩擦力是由两物体接触面间分子间的内聚力引起的。只有突起的地方才会接触，一般情况下，微观接触面积小于宏观接触面积。同时，增大压力会增大微观接触面积，由此得出的结论就是，摩擦力正比于正压力。



38.为什么最大静摩擦力比滑动摩擦力要大？

现在，人们一般认为达·芬奇是第一个提出摩擦基本概念的人。在他的启发下，几位科学家进行试验并建立了摩擦定律。摩擦定律共有四条，定律三的表述为：静摩擦系数大于动摩擦系数。

几个世纪以来，我们都在遵循这一定律。然而，摩擦过程仍旧隐藏在一团迷雾之后。就以小物块处于斜面上为例，按正压力与动摩擦因数的乘积计算摩擦力，斜面慢慢增大倾角，在这一过程中，倾角超过某一角度时，物块应当匀加速向下滑动。实际实验中，这个倾角并不是一个确定的值，而下滑过程也不是匀加速。原因是斜面粗糙程度不一致。目前实验发现：在两种固体界面非常干净的时候，最大静摩擦系数严格等于动摩擦系数。

另外，动摩擦因数和其他量也有一些关系。动摩擦因数和速度是相关的，当速度增大时，动摩擦因数先轻微增大，而后减小。我们猜测这种减小可能是由界面的微小振动造成的。当正压力很大时，界面形变明显改变物体受力情况，因而动摩擦系数会改变。



39. 牛顿第一定律可以看作第二定律的特例吗？

来看一下牛顿第一定律的表述：任何物体都要保持匀速直线运动或静止状态，直到外力迫使它改变运动状态为止。仔细思考的话，这条定律的意义在于给出了惯性系的概念，这也是牛顿第二定律、牛顿第三定律所建立的力学体系的基础。因此，牛顿第一定律是不可缺少的。如果单单将牛顿第一定律理解为 $F=ma$ 的特例的话，应该说，虽然不是错，但是不完整，对于理解整个牛顿力学体系有一定误区。



40.为什么光电效应中一个电子只吸收一个光子？

如果你只学过基本的光电效应原理，那么恭喜你，你已经很接近发现新现象了。

事实是，光电效应中一个电子未必只吸收一个光子。实验发现，就算单个光子的能量不足以达到电子逸出功，当光强足够大时，依然会有逃逸的光电子。原因是电子吸收光子是有一定的概率的，当光强很弱（相当于光子的密度很低）时，对某个电子而言，就这么点光子，能吸收一个就已经很不错了，几乎不存在吸收多个光子的可能。因此，这时观察到的光电子就是只吸收了一个光子的电子。这就是我们学的光电效应，这是低光强下的现象，与频率有关，与光强无关。当光强变大（相当于光密度增大）时，单个电子吸收光子的概率也会增大，甚至吸收多个光子也成为可能，此时就算单个光子能量不够电子逃逸，多个光子也有可能被一个电子吸收从而逃逸，让我们观察到光电子。激光（激光的光强一般很大）照射引起的多光子吸收已经有了很多实际的用途，比如已经成功用来分离同位素硫，光化学、光谱学领域也有其应用。



41.请问光电效应中光子打出来的电子可以是金属的内层电子吗？

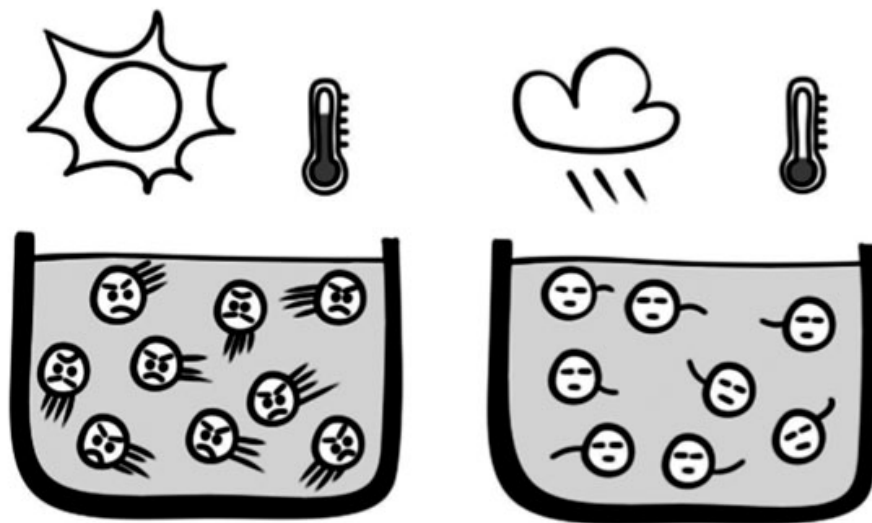
可以，虽然概率比最外层电子小。不过打出内层电子的光子不是可见光，是紫外线乃至X射线。



42.温度的本质是什么？人触摸物体时如何感受到物体的温度？

要想理解温度的概念，应该先抛掉我们在日常生活中由对冷暖的感知而获得的对温度的理解。

从纯粹的物理角度来说，温度是一个统计意义上的概念，它是一个系统中全部分子的平均动能（平均动能和温度之间只差一个常数）。温度越高（平均动能越大），系统内部就越“热闹”。



既然温度是系统的“平均动能”，那么这个系统不管是一个分子还是 10^{23} 个分子，是微波背景（空间中弥漫的电磁波）还是黑洞，只要其成分具有动能，我们都可以定义出它的“温度”。只不过对于成分较少的系统（比如只有几个分子的系统），定义温度的概念没有太大意

义。只有当我们需要在统计意义上研究系统时，温度的概念才有必要。

从这个角度理解热力学第三定律的“绝对零度不可达到”，直白地说就是，在物理现实中一个系统的平均动能不可能等于零。

上面这些是从微观角度来考虑的，我们在日常应用中不可能把所有分子的动能都加起来然后平均一下来算一杯水的温度。那怎么办呢？就像量一张桌子需要一把尺子一样，我们也需要一把测温的“尺子”。以我们熟知的摄氏温标为例，这把温度标尺的定义是：在标准大气压下，把（比如）水银柱放在水中，规定水的冰点（严格说，应该是纯水的三相点）时水银柱的高度为0摄氏度，沸点时的高度为100摄氏度，将两者之差等分100份，每等份为1摄氏度。其他测温“尺子”（包括华氏温标、热力学温标）的定义都与之类似。建立任何一种温度的“尺子”，都需要三个要素：测温物质（水银）、测温属性（水银的膨胀）、固定标准点（水的冰点和沸点）。

考虑我们对温度的感觉时，情况就变得比较复杂了，因为“冷”“暖”只是我们的感觉经验。而我们的感觉经验受很多因素的影响，比如皮肤表层的神经细胞、密度、温差、持续时间、空气湿度、风速等。我们在此不讨论前几种因素，详细内容请查看心理学的相关知识，这里只说后两种。

风速会影响人体皮肤接触的空气量。当风速增加时，人体接触的空气会增加，空气带走或带来的热量也相应地增加，“风寒指数”由此而来。当风速达到20米/秒时，空气温度为4摄氏度，但我们的感觉却是-0.3摄氏度。所以，夏季的微风更凉爽（不过，你要确保空气温度低于你的体温，否则会相反）。

而另一方面，人体通过排汗来降温，汗液蒸发带走人体热量。但是当空气的湿度较高时，水分的蒸发率就会降低。这意味着散热变慢，相对处于干燥空气中的情况，人体内保留了更多的热量。人们从这种现象中总结出了“酷热指数”。

综合风速和空气湿度给人对温度的感觉带来的影响，风寒指数和酷热指数可以合成为一个词：体感温度。

从上面的回答可以看出，物理中的温度和生活体验中的温度差别还是很大的。所以我们似乎可以得出一个结论：学习物理要忘掉日常经验。



43.光的反射的本质是什么？

光在真空中是沿直线传播的，如果光发生了反射，一定是因为光的传播路径上出现了介质。介质中的电荷在光（电磁波）的作用下会产生额外的场，介质产生的场会与入射的光场相互叠加形成新的场，新的场沿着反射光方向传播的部分就是反射光。我们可以看出，反射光是介质在入射光的作用下产生附加的场。

我们用上面提到的思路对金属的反光进行分析：金属可以屏蔽静电场和波长较长的电磁波，原因就在于，金属在光的作用下会产生附加场，在金属内部，附加场和外加电磁场刚好完全抵消。我们注意到，金属产生的附加场关于金属表面是镜面对称的（因为金属内部没有电荷，电荷都集中在金属表面），这就使得附加场在金属内部抵消

外场，在外部沿着入射光关于法线对称的方向传播，这就是反射光。由此可以看出，我们得到的反射光是满足反射定律的。



44.为什么不同频率的机械波在同一介质中传播速度一样，而不同频率的光在同一介质中传播速度就不一样？光不是具有波的性质吗？机械波没有折射率吗？

事实上，不同频率的机械波在同一均匀介质中的速度也是不同的，只是速度差异非常之小，以至于这个差异一般可以忽略不计。介质中机械波波动方程解出的波速是严格一致的，那么这种速度差异从何而来？这是由于介质中机械波的波动方程假设介质是理想的均匀介质，并且忽略了非线性效应。

在实际情况下，这样的假设只是近似地成立。在大多数情况下，介质中的机械波波长是远远大于介质中原子间距的，因此可以认为介质是均匀的。当机械波的频率足够高时（大约为GHz到THz级，这样的频率机械波一般是达不到的），匀质假设就不再成立，而这时的波速也与低频时的波速有较大的差异（一般是更小了）。线性介质的假设则是在机械波的振幅不大的情况下才成立，在小振幅时非线性效应还不是十分明显，所以可以忽略。而当机械波的振幅足够大的时候，非线性效应就不可忽略了。爆炸产生的冲击波就是这样的一个例子，核武器在空气中爆炸产生的冲击波波速可以远远大于空气中的声速。



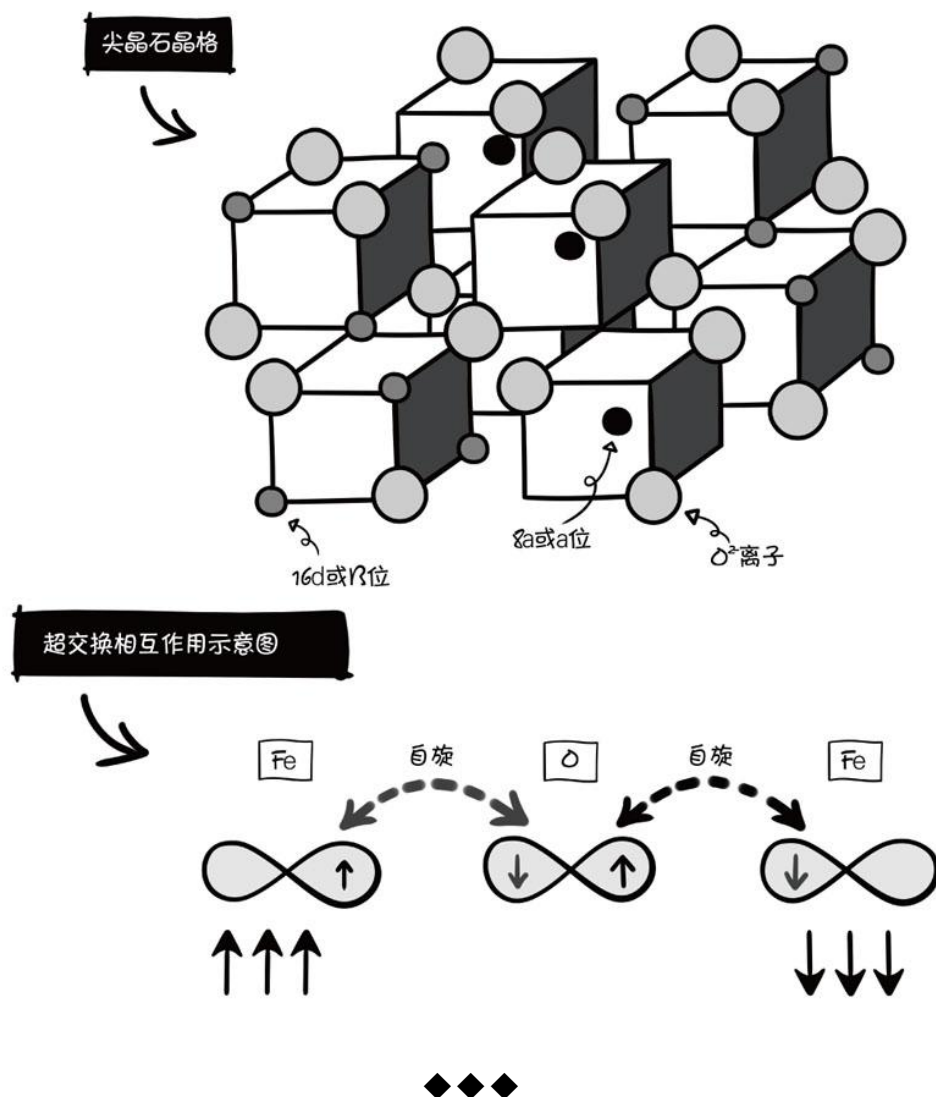
45. 四氧化三铁是如何产生磁性的？

我们需要先了解一下 Fe_3O_4 的晶体结构。尖晶石结构对应 AB_2O_4 型离子晶体。其中A为二价金属离子，B为三价金属离子。 O^{2-} 离子为立方最密堆积，二价阳离子A填充8个四面体间隙，三价阳离子B填充16个八面体间隙。晶体中原子比为8:16:32（A:B:O）。 Fe_3O_4 [$\text{Fe}(\text{FeO}_2)_2$] 的反尖晶石结构与尖晶石结构的区别在于， Fe^{2+} 占据了一半的八面体间隙，而 Fe^{3+} 占据了剩下的一半八面体间隙和全部四面体间隙。

过渡金属氧化物的磁性主要由过渡金属离子3d电子（Fe: $3d^6 4s^2$ ）提供，但是金属离子被较大的氧离子隔开，间距较大，因此两个相邻的磁性离子之间电子云几乎没有重叠部分，故不能产生直接的交换作用（电子间库伦作用的量子效应），但相邻的过渡金属磁性离子与中间的氧离子可以发生直接的交换作用，从而使电子非局域化，实现间接交换作用，也就是超交换作用。超交换倾向于使自旋反平行，因此 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 与氧离子形成的Fe-O-Fe均为反铁磁性的，而 Fe^{2+} -O- Fe^{3+} 中，A、B位上的反向磁矩并不能抵消，于是表现出了亚铁磁性。此外，阳离子-氧离子-阳离子形成的夹角越接近 180° ，间接交换作用越大。这个时候我们需要考虑晶体结构。反尖晶石结构一共有五种间接交换情况，其中夹角最大的是A-B（约 154° ）。由于篇幅有限，这里就不展示了，有兴趣的同学可以自己画平面图计算一下。 Fe^{2+} -O- Fe^{3+} 的类型为A-B，因此四氧化三铁表现为亚铁磁。另外，氧和铁形成的不同晶体结构的化合物，其磁性的判断也需要同时考虑晶体结构和交换作用。

同时，我们常说 Fe_3O_4 可以看成 FeO 和 Fe_2O_3 的混合物（这是从组成上讲的，结构是另一回事）。那大家肯定很好奇，在室温下，后两者又有怎样的磁行为呢？ FeO 表现为顺磁性， $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 为六角型结构，260开以下表现为反铁磁，260~950开则表现为倾斜反铁磁/极弱铁磁； $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 为缺陷萤石型结构（也有四面体和八面体 Fe 位），表现为亚铁磁。由此可见，磁性质不仅取决于未成对电子，同时也和结构（相互作用）息息相关。因此，有铁元素或者铁的物质不一定会被磁铁吸引。

这些材料被制成纳米颗粒时又会表现出各种不同的磁行为，那就更复杂了，大家有兴趣可以了解一下。



46.为什么气体向真空扩散不做功？

题主指的应该是理想气体吧？确实有这么个结论。有些问题呀，其实换个角度就很容易看清楚啦。物体不受任何外力（包括空气阻力、摩擦力、外部支持力等）时，总保持静止或匀速直线运动状态，动能不变吧？两个物体发生弹性碰撞，虽然各自速度改变，但是总动能不变吧？既然总能量都没变，当然就不做功喽。把这里的物体换成

理想气体模型中的气体分子，不就有结论了吗？对于理想气体而言，我们无须考虑气体分子间的相互作用，分子间的碰撞也可视为弹性碰撞，因此，这团气体向真空扩散时当然是不做功的。

另外补充一点，若是把气体装在一端封口的注射器中，再放在真空中，那么气体推动活塞向外运动就是需要做功的啦，因为这里涉及气体分子对活塞的碰撞，并将一部分能量用于推动活塞运动，转化为活塞运动的动能和摩擦生热的内能，在外界非真空的情况下，还要抵抗外部气压做功。自由扩散和有容器的情况是不同的，应注意区分。



47. 请问微观上热传递的实质是什么？

热传递主要存在三种形式：热传导、热辐射和热对流。

热传导是指介质无宏观运动时的热传递，在微观上是粒子碰撞或原子、分子等振动发生能量交换的结果。比如，在气体或液体中，分子运动相对自由，因此四处碰撞，动能发生转移；在固体中，主要是邻近原子通过键的作用将运动的能量传递过去；对于晶体，我们常将晶格的不同振动模式抽象为声子，通过声子的运动、产生和湮灭研究热的传递。

热辐射是一切高于绝对零度的物体都会具备的向外辐射电磁波的属性，也是真空中热传递的唯一方式。其微观上是由于分子、原子中的电子既可以吸收特定的能量向高能级状态跃迁，又有一定的概率辐射电磁波回到低能级。

热对流是流动介质对热量的传递过程，微观上是流体微团直接携带能量，在空间上转移位置，从而实现热的传递。这一过程通常涉及重力和浮力的作用，并且与材料密度随温度而改变的特点直接相关。



48. 光速是绝对不变的吗？

这个问法有一些歧义。如果“光速是绝对不变的”是指光速在参考系变换下绝对不变，那么以目前的认知来看，是的。当然，这里说的都是真空中的光速。

相对论被提出以前，人们通过麦克斯韦方程组计算得到电磁波的速度常量（光速 c ）。但它在哪个参考系为 c 呢？人们希望找到一个光速为这个计算值的参考系，称为“以太”。但迈克尔逊-莫雷实验的结果表明，不管沿哪个方向观测（地球运动方向与光速方向相同或不同），得到的光速值都相同，“以太”并不存在。这使得爱因斯坦将“真空光速不变”作为其狭义相对论的基础之一，20世纪初的物理学革命由此展开。因此，在相对论体系中光速不变原理是基石，不能由别的更基础的原理证明，但其正确性已被很多实验证实。如果一定要问为什么光速 c 这么特殊，这里仅提供一个参考：光的静质量为零的属性本身就特殊，而相对论体系下零质量粒子运动速度只能为 c ，因此 c 如此特殊。当然，这是在相对论体系内的自洽思考。

如果“光速绝对不变”是指光速为30万千米每秒这个数字的绝对值不变，那么这并不准确。光速的绝对值原则上是可以改变的。改变光速的绝对值并不影响狭义相对论的基本假设。后者说的是光速不依赖

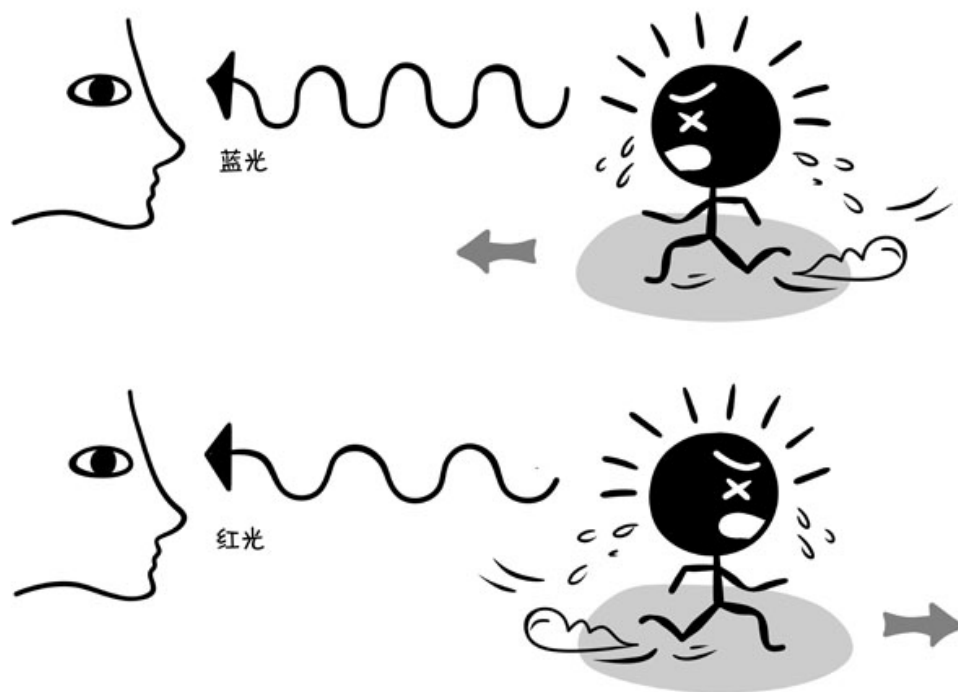
于参考系。而且，目前也有模糊的证据证明现在的真空光速可能的确与宇宙早期有些许不同（证据存在争议）。刘慈欣老师在科幻小说《三体Ⅲ：死神永生》中有关于降低真空光速到第三宇宙速度以下，形成“黑域”的设想，有兴趣的朋友不妨去看看。



49. 声波的多普勒效应是怎么回事？光有没有多普勒效应呢？红光会不会在一定速度下变成紫光？

我们看一下声音是如何传播的。当介质中的分子被声源扰动而开始振动时，它就会带动周围的分子参与振动，接下来振动又会传递给更远的分子。这样，声音就一直传播下去。传播的速度和分子之间的相互作用有关。无论声源状态如何（声源速度不超过声速），声音的传播都是因为介质分子之间相互影响，影响的效果和介质本身的性质有关，所以声速不会改变。

至于光，无论光源动不动，光速都是不变的。光的传播是由于电场和磁场在空间上相互激发。电磁波的波速可以由麦克斯韦方程组求出。无论光源是否在运动，麦克斯韦方程组都是成立的。无论光抑或电磁波，光速都可以通过麦克斯韦方程组求出，光速也不会改变。



在静止参考系中，如果光源向远离观察者的方向运动，那么观察者接收到的光频率会变小，这种现象被称为红移；如果光源向着靠近观察者的方向运动，那么观察者接收到的光频率会变大，这种现象被称为蓝移。这是因为在光源的运动方向，波被压缩，波长变短。在波源运动的相反方向，效应相反。

1848年，法国科学家阿曼德·依波利特·斐索（Armand Hippolyte Fizeau）用多普勒效应解释了恒星光谱的偏移，并指出可以用多普勒效应计算恒星的相对速度。不过，观测明显的多普勒效应需要光源达到很大的速度。比如，要让红光（波长400纳米）通过蓝移变成紫光（波长760纳米）需要波源速度达到光速的0.56倍，相当于每秒绕地球4圈。这是非常快的速度。



50.人们是怎样发现动量、角动量这两个比较抽象的物理量的？该如何理解角动量呢？

其实人们一开始没有想到动量这个概念，而是想到了动量守恒。这源于16世纪至17世纪西欧哲学家对宇宙运动的思考。

当时的哲学家发现，周围的物体——比如弹跳的皮球、飞行的子弹、运动的机器——最后都会停下来，于是自然而然地提出一个问题：天上的月亮会不会停下来呢？根据当时的天文观测，人们没有发现天体运动有丝毫减少的迹象，于是当时的哲学家认为，宇宙中运动的总量是不会减少的，只要找到一个适合的量描述，就可以看出宇宙的运动是守恒的。

法国的笛卡儿（就是发明直角坐标系的那位）最早提出：在碰撞过程中，质量和速率的乘积是不变的。但是后来克里斯蒂安·惠更斯（Christiaan Huygens）在研究碰撞问题的时候发现按照笛卡儿的定义，动量不一定守恒。最后，还是站在巨人肩膀上的牛顿修改了笛卡儿的理论，将质量和速率的乘积改成了质量与速度的乘积，这才真正意义上定义了动量。动量还被写进了《自然哲学和数学原理》（*Mathematical Principles of Nature Philosophy*）。然后，还是牛顿，在研究开普勒第二定律（太阳系中太阳和运动中的行星的连线在相等的时间内扫过相等的面积）的时候，隐约给出了角动量的定义，并且用平面几何的方法证明了在中心力下的面积定理（这个也写进了《自然哲学和数学原理》）。后来，莱昂哈德·欧拉（Leonhard Euler）在《力学》（*Mechanica*）中也解决了一些角动量的问题，但是没有进一步发展；丹尼尔·伯努利（Daniel Bernoulli）提出了类似现代意义上的角动量，但是也没有严格化。后来几经流转，在皮埃尔·拉普拉斯（Pierre Laplace）、路易·潘索（Louis Poincaré）、让·傅科（Jean

Foucault，利用傅科摆显示地球自转的那位）手里过了一遍之后，直到1858年，一位苏格兰工程师威廉·兰金（William Rankine）在他的手稿中严格定义了角动量。

角动量主要从角动量守恒来理解，它是人们偶然发现的封闭系统转动过程中的一个不变量。科学家最终证明，在更复杂的情况下这个守恒依然成立。深刻（听不懂）地说，它是空间转动群的生成元，来源于系统对空间转动的对称性。

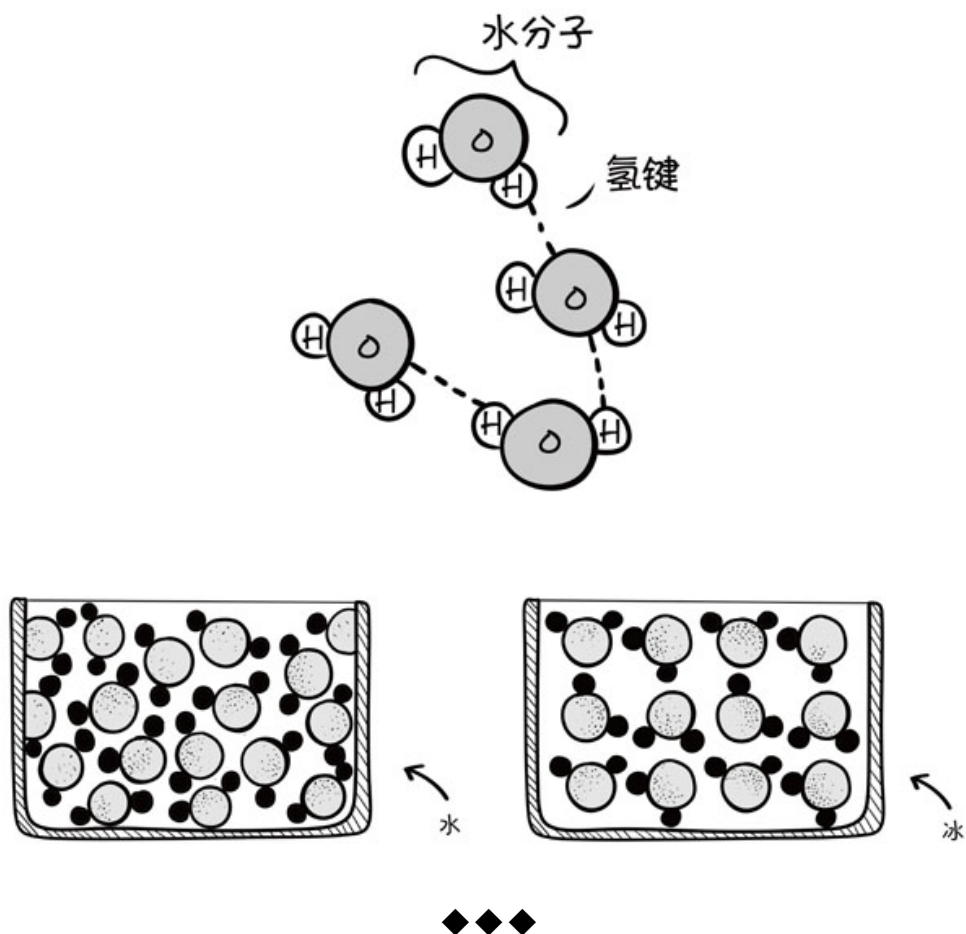
参考文献：https://en.wikipedia.org/wiki/Angular_momentum。



51.一般情况下，液体的分子排列无序，间隔较大，固体分子排列有序，间隔较小，为什么水结成冰密度却变小了？

H_2O 的体积随温度的变化反常，这一点可不仅仅体现在结冰的时候。事实上，在降温过程中，到了4摄氏度，水的体积就开始膨胀了。这要归因于水分子的特殊之处——氢键。 H_2O 的三个原子不是一条直线，而是呈一个角度排列。除了H和O之间的化学键之外，还有水分子之间的氢键作用。温度较高时，氢键作用并不明显，到了4摄氏度以下，氢键的作用堪比分子内部的化学键，其效果就是让水的排列有了一种特殊取向，即水分子之间的H“顶”在一起。这是一种空间利用率很差的排列方式，所以 H_2O 的体积就变大了。温度越低，这种排列就越明显，体积就越膨胀，直到 H_2O 成为固体。

思考题：0摄氏度的水和0摄氏度的冰哪个分子间距大？



52.为什么抽气泵不能把真空罩抽成完全真空状态？

这里说的“完全真空状态”应该是指完全没有已知粒子的状态，这的确无法达到。

一方面，你要抽空的腔体内壁在源源不断地“放气”，也就是不断有粒子从中跑出来，这是无法避免的；另一方面，即便没有这些跑出来的气体，泵在抽气时，抽气的速率也会随着真空度的增加而降低，也就是说，你越抽越慢，再久也无法完全抽干净。综合两种因素，随

着抽气速率不断下降，到了与腔体内壁放气速率相等时，这里就达到了动态平衡的状态，此时的真空度就是稳定时的真空度。



53.为什么发射卫星的轨迹是椭圆形，而地面上的抛体运动轨迹是抛物线？

其实都是椭圆啦！只是在地面附近，物体的运动范围相比地球而言小得多，引力场可近似为匀强场，此时推导得到物体轨迹为抛物线。实际上，椭圆顶点附近的小段曲线，也确实可以用抛物线来近似。不过，对于有心力场中物体的运动轨迹，需要用Binet公式严格求解，涉及理论力学和微积分的相关知识。

若不考虑空气阻力等因素，仅考虑最简单的模型，则平方反比场中物体的运动轨迹为二次曲线，即圆锥曲线，包括：椭圆（包含圆形这一特殊情况）、抛物线、双曲线，三者分别对应偏心率 $0 \leq e < 1$ ， $e = 1$ ， $e > 1$ 的情况。相应地，我们也可以通过该物体的机械能 E （动能与势能之和）判断轨迹的形状， $E < 0$ 时为椭圆， $E = 0$ 时为抛物线， $E > 0$ 时为双曲线。

所以，在地面上抛射物体也是可以得到严格的抛物线的，只是其动能要大到足以完全脱离地球引力的束缚才行，这可是很大的能量，与普通情况有本质的不同。比如，火星探测器至少需要达到第二宇宙速度 $(2gR)^{1/2} = 11.2$ 千米/秒才能沿抛物线离开地球，超过第二宇宙速度才能沿双曲线离开地球，如果速度处于第一宇宙速度到第二宇宙速度之间，就只能做一颗沿着椭圆静静环绕的卫星啦，如果速度再小一

点.....对不起，那就是一个坠落的悲剧，真的跟你扔个石子掉到地上没多大区别了。



54.如何简单阐述角动量守恒？又该如何使用？

角动量守恒在经典力学和量子力学中有不同的意义，所以我们分为两个部分回答。

（1）经典力学中的角动量守恒

我们在体系中定义一个叫角动量（ $L=r \times p$ ）的物理量，如果我们测量/计算发现任意时刻的角动量数值不变，就称之为角动量守恒。在牛顿力学中，角动量的变化由力矩决定： $\frac{d}{dt} L=M$ 。可见力矩为0，角动量不随时间改变。这就是角动量守恒的条件。在分析力学中，当体系的拉氏量不随体系的旋转而改变时，体系的角动量守恒。这两种表述是等价的。利用角动量守恒可以简化体系的求解，如有心力场就是典型的角动量守恒情况，我们可以利用角动量守恒直接推出开普勒第二定律。

（2）量子力学中的角动量守恒

我们在体系中定义一个算符叫作角动量算符（ $L=r \times p$ ，这里的字母 L 代表角动量算符），角动量算符的本征值就是角动量。如果我们测量/计算发现任意时刻的角动量的平均值不变（注意，量子力学要求平均值不变，经典力学只要求数值不变），我们就称体系的角动量守

恒。在量子力学中，要保证角动量守恒，角动量算符和哈密顿量对易即可。在角动量守恒的体系中，我们可以把角动量作为好量子数，利用好量子数可以使哈密顿量对角化的过程大大简化。

55.磁化的本质是什么？

磁化过程就是磁性材料在磁场作用下，磁化状态发生改变，直至达到磁饱和状态。

在同一磁体内，自发磁化强度大小是一致的，磁体中有许多磁畴，这是铁磁材料在自发磁化的过程中为了达到能量最低产生的小型磁化区域，每个区域内部有大量原子，原子磁矩方向相同。而相邻的不同区域之间原子磁矩排列方向不同，宏观上表现为自发磁化强度大小相同，但是方向不同。磁畴的交界面称为磁畴壁，表现出的整体的磁化强度可以写为：

$$M = \sum_i M_s V_i \cos \theta_i,$$

其中 M_s 为自发磁化强度， V 是磁畴的大小， θ 是磁畴方向和易磁化轴的夹角。因此，在外磁场作用下，发生改变的是这三者，分别对应内禀磁化强度的改变、磁畴壁位移以及磁畴转动。



56.比热容会随物质温度上升而增大吗？

热容量（比热容和热容量只差一个质量系数，讨论两者是一样的）是系统升高单位温度时内能的变化。一般情况下，在很小的温度范围，我们认为热容量是不变的，实际上热容量随温度变化是物质世界普遍存在的现象。

比如，双原子分子理想气体的热容在常温下为 $5/2Nk$ ，在达到几千度的时候变为 $7/2Nk$ （ N 为分子个数， k 为玻尔兹曼常量）。我们可以把双原子分子想象成同时用弹簧和玻璃棒连接的两个小球。开始时温度较低，“分子”运动速度较慢，能量不足以撞碎玻璃棒，这时弹簧相当于不存在。当温度逐渐升高，玻璃棒破碎，弹簧就起作用了，振动自由度参与到能量的分配当中。由于经典的能量均分定理，原来平均分配给平动自由度和转动自由度的能量，现在需要分给振动自由度一部分。于是，吸热相同时，平动能增加得没那么多了，温度也升高得比原来少了，即热容增大。当然，更为准确的说法是，振动能是量子化的，较低温度的热运动不足以使分子发生振动能级上的跃迁，要达到 10^3K 量级，热容才需要考虑振动的影响。

热容随温度变化还有一个比较典型的例子，就是电子。电子的热容和温度成正比，常温下很小，要达到 10^4K 的量级才能和晶格热容相比较。电子是费米子，满足泡利不相容原理，每个能级只能占据两个自旋相反的电子，所以最高占据能级已经很高了，常温的热运动只能影响最高占据能级附近的一部分电子。考虑晶格振动和电子的热容，我们就得到了在温度极低的情况下，金属的热容趋近于0。比较有意思的是，根据热容的定义，热容可以为负值。黑洞的温度和其质量成反比，而质量和能量是相当的，也就是说黑洞吸收能量后温度下降，从而表现出负的热容，并且和温度的二次方成反比。



57.为什么物体在最速曲线上运动得最快？

最速曲线是指不考虑摩擦的情况下，小球从一点自由滑落到下面另一点用时最短的轨道曲线。首先可以肯定的是，由于机械能守恒，物体无论经过哪个轨道到达底部的速度都是一样的。直观来看，好像两点之间线段最短，直线过去应该用时最少。然而并不是这样。如果一开始的斜率绝对值比两点间的直线更大，它将使小球更快加速，这是这种情况用时更少的一个因素，虽然另一个因素会导致用时更长——路程变长了。总之，不能简单认为直线用时最少。

求最速曲线需要结合各处的斜率（决定加速度）和路程，把所需时间 t 当成曲线方程 $y(x)$ 的泛函数，也就是把 $y(x)$ 及其导数放在积分中表示时间。 $y(x)$ 本身是个不知道具体形式的函数，时间表示成了 $y(x)$ 的函数，像这样的函数就叫作泛函数。利用变分方法得到的令时间最小的最优解 $y(x)$ 就是最速曲线的方程。没有变分基础的同学可以大致了解一下，有变分基础的同学.....估计你们都已经想过这个问题了吧。



58.为什么电场线越密，电场强度越大？

我们以静电场为例解释这个问题。电场线作为描述电场的可视化手段具有直观、形象的特点，但同时它丢失了对电场描述的精确性。高中课本中提到，电场线密的地方电场强度大，但是我们也可以通过

电荷的分布来求出电场强度的大小。这两种方法看起来是各自独立的，那么它们给出的大小是一致的吗？答案是肯定的：电场中某一点会有一个方向，沿着这个方向画一条短线到达另一点，此处也有一个电场方向，再沿这个方向画一条短线，以此类推，可以得出一条电场线。

如果我们在没有电荷的电场中做一个垂直于电场的小圆，以圆周上各点为起点做电场线，我们可以得到一个由电场线围起来的管道。从电场线的画法我们可以看出，管壁上电场方向都沿切向，所以管壁上的电场对于整个管道的电通量没有贡献，电通量只来自管道两端。由高斯定理可以推断，两端的电通量大小相同符号不同，又因为电通量的定义是 $\Phi=ES$ ，所以面积小的一端电场就强，面积小就意味着管壁上的电场线离得近，换句话说就是电场线更密。所以，电场线越密的地方电场强度越大。



59.电子不是互相排斥的吗，为什么会有电子对的说法？

首先声明，这里的电子对，确实是两个电子，形成了一对快乐的小伙伴——电子对。

“异性相吸，同性相斥”是我们从小就耳熟能详的法则，物理老师告诉我们，这个法则不仅适用于男孩子和女孩子，也适用于磁和电。用于磁的时候，性质指的是磁极；用于电的时候，性质指的是电荷。那么问题来了，电子之间相互排斥，也就是说它们“讨厌”着对方，那它们又为什么会一起愉快地玩耍，形成“对”呢？

在没有外界“帮助”的时候，两个电子确实是不可能形成稳定的对态的。它们就像两个讨厌着对方的冤家，是不会想见到彼此的。要是有一个中间人呢？有个中间人调解一下，两个冤家是不是有时候也能愉快地玩耍了？我们以BCS超导理论中的库珀对为例，这个情况下的“中间人”就是声子，也就是晶格振动。库珀曾经证明：一般来说，只要电子之间存在引力，哪怕很微小，也会使费米面附近的电子结合在一起，形成库珀对。简单来说就是只要有引力，有些电子就可以形成对。那么我们来分析一下低温超导中的这个引力是怎么出现的。

晶格中的离子实都是带正电的。当第一个电子在某些离子实中间运动时，引力作用会使该区域的离子实密度出现涨落，电子附近的离子实密度变大。密度大的离子实显然对第二个电子更有“吸引力”，这个吸引力在一些情况下是可以大于电子之间的斥力的，这样合成的有效作用就是吸引力了。在这个吸引力下，就能出现电子对了。



60.为什么反射、折射可获得偏振光？它们是如何使光的振动面只限于某一固定方向的？

考虑光的反射和折射时，我们一般利用经典电磁理论就足够了。在经典电磁理论中什么才是最基本的呢？没错，就是麦克斯韦方程组。当一束光照到介质表面时，会形成一个边界条件，结合麦克斯韦方程组，我们可以通过解这个边界条件得到反射光和折射光二者的电矢量与入射光的电矢量的关系，而这个关系就是大名鼎鼎的菲涅尔公式。通过分析菲涅尔公式，我们可以知道，当入射角为布鲁斯特角时

（此时反射光与折射光垂直），反射光为完全偏振光，偏振方向垂直于入射面。但是一般情况下，若入射光不是完全偏振光的话，折射光是无法产生完全偏振光的。

关于菲涅尔公式的更多具体知识，读者可自行查阅电动力学相关的图书，篇幅有限，这里不多阐述。



61.在橡胶中，声音的传播速度只有几十米每秒，比室温空气中速度低。请问这里有什么内在原理吗？

从本质上来说，声速对应的是微小扰动在可压缩介质中传播的速度。在固体中，声波既有横波也有纵波，即材料中的原子或分子在垂直或沿着波传播的方向上来回地振动。我们简单地想一下，如果单个分子或原子自己振动的方向和声波传播方向尽可能相一致，那么在该方向上，分子间碰撞的概率增大，扰动传播的速度就会加快，换言之，声速也就更快了。一般说来，固体中声速的公式为：

$$v_s = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

其中， K 为弹性模量， ρ 为固体材料的密度。计算固体材料的声速，要从这个材料的具体性质参数出发。因此，声波在橡胶中的传播情况也不能一概而论，天然橡胶中声速很低，但如果提高了硬度，比如制作出了硫化橡胶，那么在其中传播的声速就会提高很多。



62.相对论效应能用速度合成来解释吗？物质都以光速 c 进行时空运动，空间方向分速度变大会使时间方向分速度减小。

哇，这位同学，这个你是不是自己想出来的？的确可以这么考虑。相对论中一切质点的四维速度的模均为光速 c ，不论其质量是否为0。不过，四维矢量模值求法和一般的欧氏空间中矢量的模值求法不同，这和度规张量有关，不能简单地使用平行四边形法则。

这里有一个与之相关的内容，如果我们建立一个 (x, y, z, ict) 四维空间，我们可以发现，其实洛伦兹变换就是 (x, ict) 平面上的转动公式。



63.凸透镜可以将物体放大，我们为什么还需要显微镜？

我们来分析一下凸透镜的放大倍数公式 $k=f/(f-u)$ ，可以看出，放大倍数取决于两个因素：一是凸透镜的焦距 f ，二是物距 u ，上述公式在 $u < f$ 时成立。在保持 f 不变的情况下，我们可以通过不断增大 u 来得到更大的放大倍数（相信用过放大镜的同学都有体会）。

那为什么我们还需要显微镜呢？考虑到实际情况，人眼观察物体的大小，一方面取决于物体的实际大小（线度），另一方面取决于物体对人眼的张角。这里提到的放大率，确切地说是线度的放大率，如果我们不断增大物距 u ，虽然正立的虚像会不断被放大，但同时它到我们人眼的距离也越来越远，所以就实际观察而言，我们并不能通过一

个简单的凸透镜得到很高的放大倍数。当观察非常微小的物体时，显微镜就必不可少。一般而言，凸透镜上所标注的放大倍数，是指虚像位于人眼明视距离（最适合正常眼细致观察物体又不易产生疲劳感觉的距离）时的放大率。

值得注意的是，上述放大倍数的公式是在理想凸透镜以及近轴光线条件下导出的，实际应用中还要考虑球差、色差等因素的影响，它们也会限制凸透镜的放大倍数。



64. 非金属加压之后会变成金属，这是什么原理？为什么质子数会改变？

常见的物质都是由原子构成的（废话），它们的导电性要由原子的相互作用方式、空间分布形式给出。如果我们逐渐增大压强，原子的组织形式就可能发生变化，物质的导电性就可能被改变，至于具体怎么变，情况可能很丰富。

比如，有一类绝缘体叫莫特绝缘体，这个物态差一点就可以被称为金属了，但是其电子间的相互作用使得能带劈裂而变得绝缘。不过，人们发现，只要加大压强就能使这些能带移动并交错，使之变为导体。

对于金属氢，这一变化更加剧烈。我们知道通常情况下，氢原子都是两两组成分子，再以范德华力结合为液体与气体。但是人们根据理论预言，只要加上足够的高压，氢原子就会像金属一样构成晶格，

而它的电子也会像在金属中一样巡游。这时，原子间的相互作用就更类似金属键了，以类似非金属形式存在的氢也就变成了完全类似金属形式存在的氢了。与之类似，人们也预言许多富氢的材料在高压下会变得类似金属。比如，人们已经成功观察到了 H_2S 的金属化，但是金属氢与其他材料的制备还不是很顺利。一个有趣的地方是，氢离子是裸的质子，所以金属氢可以视为一种电子简并物质。

高压下的物态变化应该还有很多种，我估计物质金属化的过程还有许多可能性，不过我水平有限，现在只能想到这两个。我觉得相反的过程也应该是存在的，举一个可能不太恰当的例子，石墨是一种导体，但是在高压下石墨可以被压成钻石，这就是一种绝缘体了。



65.物理中的边界条件是指什么？它很重要吗？边界条件就是临界条件吗？

我们在解决实际问题的時候，光有一个足以描述系统的方程是不够的，往往需要其他一些附加的关于系统的信息，比如初始状态、边界上的情况，等等。这些附加条件被称为定解条件，而边界条件就是其中的一种。

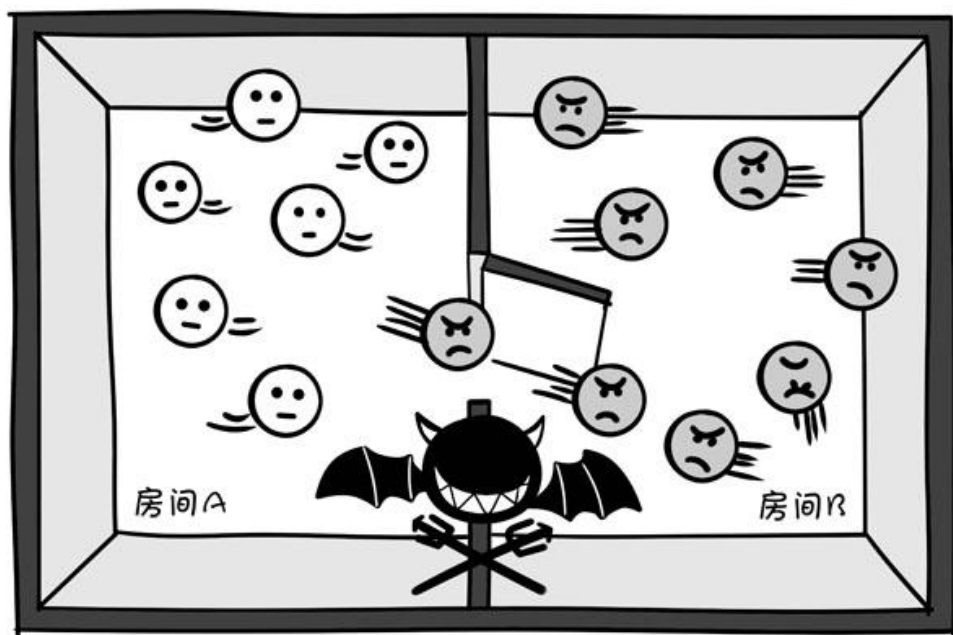
举个例子：求解一根弦的振动时，除了关于这个弦的振动方程（关于这根弦的各种参数应该已经包含在这个方程里）以外，我们还需要这根弦两端的情况——可能是固定的，也可能是自由的——这就是关于这个问题的边界条件。而临界条件通常是指系统由一种状

态刚好转化为另一种状态时满足的条件，与边界条件不是同一个概念。



66. 麦克斯韦妖是怎么回事？

麦克斯韦妖是麦克斯韦所进行的一个思想实验，用于说明热力学第二定律的局限性。



麦克斯韦设想一个容器被挡板隔为A和B两个区域。有一个小妖控制着挡板，小妖知道每个分子的运动速度，并且当A中速率较高的分子要撞上挡板时，小妖会为其开一扇门，引导分子进入B，而不让速率较低的分子通过。对于另一侧，小妖则让速率较低的分子进入A，速率较高的分子留在B。这样一段时间后，A中分子整体速率较低，B中分子速率较高。即A中温度较低，B中温度较高。这似乎在不做功的

情况下，使得A的温度降低，B的温度升高。因此，麦克斯韦认为：仅在物体较大，难以区分构成物质的分子时，热力学第二定律才成立，所以要对热力学第二定律加以限制。

我们都知道，麦克斯韦妖是被证伪的。原因很简单：在麦克斯韦的假想中，容器应该是孤立系统。实际上，为了知道每个分子的运动速度，我们需要加入能量或者物质进行检测，容器实际上不是孤立系统，因此麦克斯韦妖不仅没有驳倒热力学第二定律，反而成为热力学第二定律的一个例证。



67.如何生动形象地理解晶格振动？

晶格振动，就是晶体原子在格点附近的热振动。晶体中的原子很调皮，它们不喜欢在受力平衡的地方老老实实在地待着，而喜欢绕着格点进行小幅度的振动。

现在，我们一般用声子来描述晶体中原子的振动。我们对晶体中原子势场做泰勒展开，只保留到二次项，然后由晶格的平移对称性，可以得出结论：晶体中所有的振动都可以用有限多的振动模式叠加得到，每种振动模式都代表了原子集体形成的简谐波。这些振动模式的量子化就是我们所说的声子（看不懂的话可以跨过这一部分）。

简单来说，复杂的晶体振动可以用有限种简单集体波动的叠加来描述。我们在研究各种和晶体振动相关的理论时，只需要考虑这些振动模式，不需要考虑具体的复杂振动。



68. 惯性质量和引力质量到底有什么区别，不都是质量吗？

虽然它们都是质量，但是仔细思考“质量”的含义，我们就会发现两者的概念并不相同。

惯性质量表示的是力对物体产生加速度的困难程度，这里并不针对特定种类的力，只是表明一个力的效果。而引力质量可以类比电荷，或可称为“引力荷”，表明的是产生引力和接受引力的能力大小。这样看来两者不是一回事，甚至并不一定有什么关系。

不过牛顿注意到，单摆的周期只与摆长有关，而与摆锤的材质和重量都没有关系。（单摆问题本质上可以用 $F=ma$ 来研究，引力质量包含在 F 里，而 m 是惯性质量。）这说明，对于任何物体，引力质量和惯性质量的比是一个常数。以后的很多实验也都证实了这一点。而根据万有引力定律，我们可以把两者的比值定为1，将常数收缩到万有引力常数里面去。

惯性质量和引力质量的等效性是广义相对论第一基本原理——等效原理——的基础。如果没有引力质量和惯性质量的严格相等，引力场和加速场的等效就无从谈起，爱因斯坦的电梯思想实验也就完全是臆想了。



69.力学和物理学怎么就分家了？

大家都是从牛顿力学出发的，但走了不同的路。

物理学在努力拓宽力学的适用范围，从微观的量子力学到高速的相对论力学，努力加深人类对基础物理学定律的理解。而力学专业是在牛顿力学的框架下不断细化深入，不断研究越来越复杂的系统，比如研究湍流、非线性效应，以及具体到导弹和航天器的动力学分析。

两条路的研究范式差别比较大。力学系学生可能完全不需要学习对物理系来说最重要的量子力学，物理系学生可能对力学系最重要的偏微分方程和非线性效应只有一个非常粗浅的认识。

这两条路都极其复杂，足够耗费一个人的一生，所以慢慢就分家啦。

思考题：钱学森是世界著名的什么学家？



70.量子力学有三套等价的理论基础框架：波动方程、矩阵方程、路径积分。初学者要从哪里入手呢？三个都要学吗？

三种是等价的，但各有特点。

波动方程的特点是图像清晰，用到的数学比较常见，方便实际应用，在处理化学中的原子、分子的电子结构时可以让你非常得心应手。

矩阵方程在表述量子力学自身的理论结构时最为清晰，最容易让你理解量子力学到底在做什么，在处理量子信息和凝聚态理论中的一些离散模型时用得很多。

路径积分可以用最自然的方式把经典理论过渡到量子，对量子力学的物理意义表现得更深刻，是通往更高层次的物理的垫脚石，但计算最麻烦，一般不用来处理实际问题。

所以结论来了，对于化学系和生物系的一些同学而言，量子力学只是一门计算工具，他们最适合学习薛定谔的波动方程。绝大多数（甚至是所有的）物理系学生则应该先学矩阵力学形式，明白量子力学到底在干什么，再学波动力学。想学量子场论，或者对物理理论本身感兴趣的同学，应该在学完矩阵力学和波动力学之后再学路径积分。



71. 牛顿引力为什么不能改写成洛伦兹协变形式与狭义相对论相融？有哪几方面的考虑？

建筑师修个房子还要考虑相对论修正，建筑师表示好累。

简单也是一种美德。它使得人们在学会知识、收获回报的同时，还能把更多的精力投入到其他有意义的事情中去。纵观人类历史，如果什么东西简单又错不到哪里去，那它就很难被彻底取代，包括科学、艺术、政治、传统文化、世俗偏见，等等。



72.“量子力学”与“量子场论”两门课有什么区别？必须两个都学吗？

量子力学能解决非相对论性的单个粒子的微观世界的运动问题——听起来好像很弱，但这个范围已经包括了绝大部分化学、部分生物、整个微电子学、芯片与集成电路、现代光学、量子信息，等等。量子力学可以说是物理学中应用最广的一门学科，对于绝大多数学习物理类专业的学生而言，量子力学都是必须好好掌握的。

量子场论解决的是相对论性的多个粒子耦合的微观世界的运动问题——这很强大，也很复杂，所以一般能用量子力学的地方我们是绝对不用量子场论的。它主要用于比较前沿的物理研究，比如弦理论、高能物理（包括核物理和粒子物理），以及凝聚态中的强关联物理。大部分物理系学生不需要学量子场论。

致需要学但学不懂的同学——没事，你有一辈子嘛。



73.人们如何保证皮秒、纳米、纳开等单位的精度？

测量说到底还是计数或比较。

运动员跑百米所需要的时间就是与裁判员秒表跳动次数的比较结果。秒表对运动员跑步时间测量的准确性由秒表跳动频率的稳定性决定。通常，秒表跳动的参考源来自石英晶振，其每秒的跳动频率变化

可达百万分之一量级，这样的稳定度对于运动员跑步的时间度量已经足够准确了。

同样的道理，得益于自然的馈赠，原子内电子的跃迁是原子的固有共振频率，其稳定程度可达 10^{-18} 次量级，相当于160亿年不差1秒。在如此稳定的原子钟（比如铯原子光晶格钟）的辅助下，人类通过跟它的计数比较，自然可以获得皮秒甚至飞秒的测量准确度。

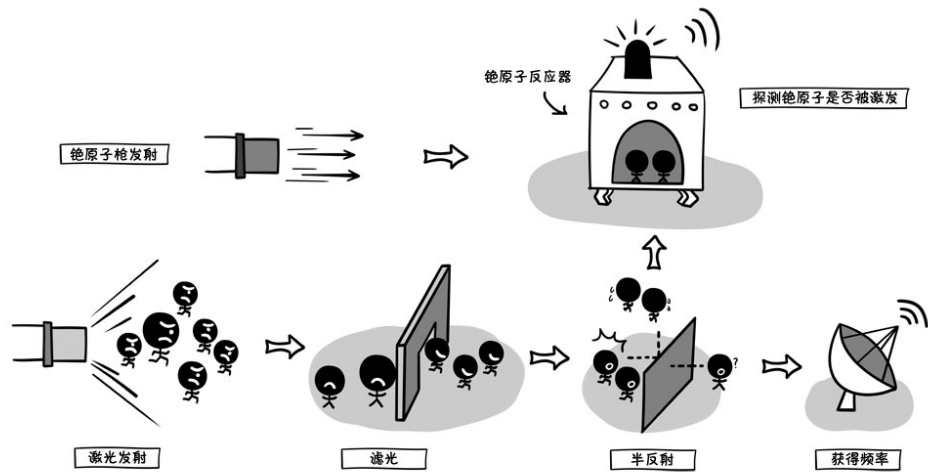
时间/频率是人类掌握得最精确的物理量，其他物理量若能跟时间/频率建立直接联系，其测量精度也随之提升。比如长度的国际标准定义，依赖于光速不变定理，1米可转换成光在真空中跑 $1/30000000$ 秒所经过的距离。

不过，如果教条地应用国际标准，将其推到微观尺度——比如将纳米尺度的测量转换为高能X射线（波长在0.1纳米以下）在飞秒时间内运动的距离——真要这么干会让实验物理学家睡不着觉，因为在如此小的尺度下进行如此短时间延迟的测量超过了人类目前操纵自然现象的极限。

实际上，更靠谱的做法是利用真空中光子内禀的波长 λ 与频率 ν 的关系（ $\lambda=c/\nu$ ），将特定频率的波长作为微观世界的标准尺子。比如，常用的铜靶 $K\alpha_1$ 对应的X射线波长是0.154纳米，我们也可以使用高大上的、波长大范围可调的同步辐射光源。

极低温度的测量，依据微观原子的动能对温度的定义（ $3kT=mv^2$ ， k 为玻尔兹曼常数），可转换成在显微镜下测量的被激光冷却的原子的扩散速度。以铯原子为例，如果在显微镜下看它们在1秒

内移动1毫米，则估计其温度是5纳开。据我们所看到的报道，目前冷原子领域的最低温度记录是几十皮开。



宇宙篇

01.地球为什么没有因太阳一直照射而越来越热？

地球确实是越来越热，不过主要原因是温室效应，而不单单是因为太阳一直照射。地球的能量来自太阳光的照射，而从地球诞生到现在，阳光就一直照射着，地球上的能量岂不是越来越多，温度越来越高？

其实不然。地球这个热力学系统，在源源不断地吸收太阳辐射的能量的同时，也在向外面散发着能量。照射到地球上的一部分阳光被地表吸收，一部分被植物光合作用储存成生物能。而动物的活动又将这部分生物能消耗掉，变成热量散布到周围的环境中。这些因素都将使地球环境中的能量升高。

我们知道，有温度的物体都会向外界散热，其散热方式包括热传导、热对流和热辐射，地球也不例外。不过面对太空这个环境，地球只剩下了辐射这一个方式。这样，地球一方面从太阳光得到能量，一方面又通过辐射红外线向太空散发能量，当吸收热量与辐射热量达到平衡时，地球的温度就不变了。当然，得达到这个热平衡，温度才能不变。所谓的温室效应，简单说就是大气层中二氧化碳等气体浓度越来越大，本来要辐射到外太空中的红外线被大气吸收了，向外散发的热量减少，而本身吸收的能量又不变，导致在现阶段地球整体的温度上升。

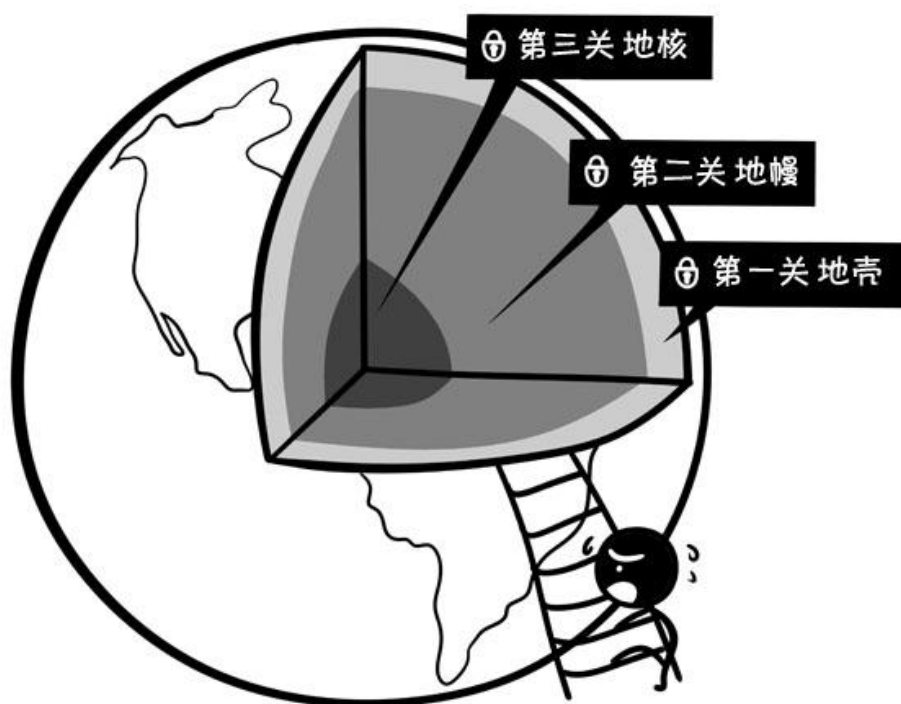


02.地球到底是实心的还是空心的？科学家如何知道地球内部有核、幔、壳结构？

如果看过凡尔纳的《地心游记》，你肯定会被书中主角一行人从火山洞跳入地心的经历所吸引。在凡尔纳的年代，人们难以对地球内部结构有深层的认识，地球空心论曾大行其道，当时也有很多试图找到通往地心的洞穴的冒险家。但如果对此稍加分析，我们就会发现地球空心很大程度上是不合理的。如果是空心的，那么地球如何抵抗大质量物体相互吸引的引力而不至于坍缩呢？

花开两朵，各表一枝。人类发现地球的分层结构时利用了地震波。1910年，克罗地亚科学家莫罗霍维奇发现地震波的速度在地下某一深度处有突然的增高，这里就是地壳与地幔的分界面。1914年，美国科学家古登堡发现在地下更深处，还有一个速度分界面，这就是地幔与地核的分界面。

但我们对地下真实情况的了解还是很肤浅的。人类目前能到达的深度有限，苏联的科拉钻井到了地下12千米处，但连地壳都还没有钻破。利用对岩浆等的研究，我们也能获得一些关于地幔物质的数据。但目前我们对地球内部物质组成还有很多未被证实的猜想。



03.地球及一切其他星球自转的原动力来自哪里？是什么能量一直驱使着星球的自转？

这个问题非常基础，但问的朋友有点多，所以我们还是回答一下吧。

在理想情况下，物体的运动是不需要能量来维持的。物体天然就可以永远运动下去，这是由伽利略发现的经典力学的基本法则之一。现实生活中物体的运动往往不能永远维持下去是因为摩擦力、空气阻力等耗散作用普遍存在，所以物体的运动需要额外施加能量来维持。

而星球在真空中自转，几乎没有耗散作用，天然就可以长久地自转下去，不需要能量。

不过物理君还要强调一点，永远自转下去不等于永动，永动机的定义不是字面上的“永远动下去的机器”，永动机是指能够永远产生可用的能量（而不产生别的不可逆变化）的机器。



04.地球的自转速度是否在减慢？

嗯，是在减慢。日子终于可以过得慢一些了——物理君瞎说的。

地球的自转周期，也就是一天的长度，每隔十万年增加1.6秒。而地球自转速度变缓的原因可归为外界因素和内部因素两类，其中外界因素起主要作用。外界因素主要来自长期的潮汐摩擦效应，内部因素主要来自无规的地核运动和季节性的大气运动。

所谓“潮汐摩擦”，简单说就是，月球和太阳通过占据地球表面71%的海洋引发潮汐，把地球拖慢了。地球表面的潮汐形成两边较鼓的椭圆，其旋转的速度要慢于地壳的旋转速度，因此地壳与海洋之间的剧烈摩擦导致地球自转速度变慢。另外，潮汐的旋转角速度快于月球的绕转角速度，因此海洋的部分角动量又通过潮汐力产生的力矩传递给了月球。

当然，说到地球上不规则分布的物质，由于地球自转角速度相对更大，它们都会通过月球潮汐力产生的平均力矩传递角动量给月球。

即使地球是个完美的球体，也会因为引力的作用产生变形，从而产生力矩，这就是所谓的“潮汐锁定”。

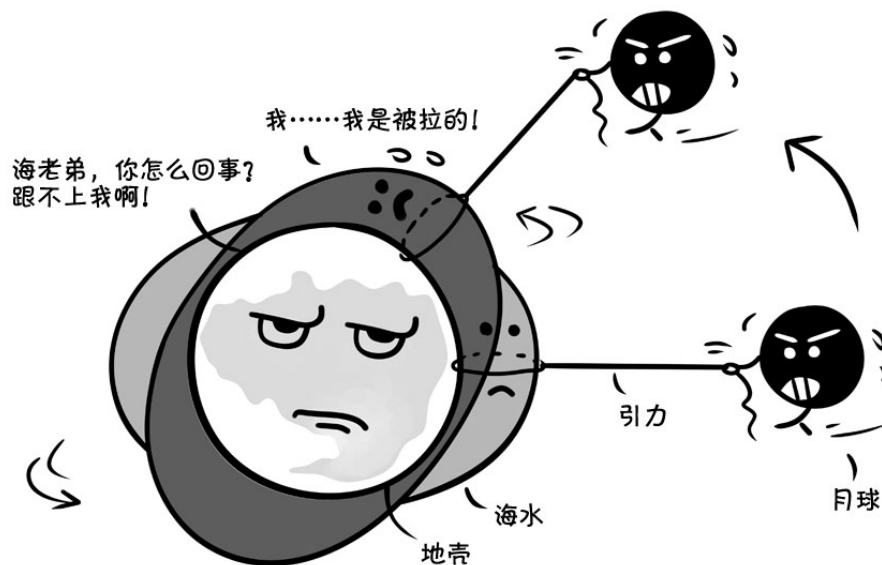
而且，由于能量守恒，在地球自转速度减慢的同时，月球公转周期会变长，并慢慢远离地球。最终，这个潮汐摩擦和力矩的作用使得作用双方趋于相互锁定，即月球公转周期与地球自转周期相同，这也意味着一天与一个月的时间相同。我们常见的月球实际上一直以来都是以同一个面朝向我们的。这是因为月球的质量要比地球质量小得多，月球的潮汐锁定已经提前完成。

同样的过程也发生在太阳和地球之间。现在，地球上一年的时间远大于一天的时间，当有一天地球相对于太阳的潮汐锁定完成，那将出现一天与一年的时间相等的情形。那就真的是“度日如年”了。当然，有足够长的演化时间，地球和月球、太阳和地球才能分别达到潮汐锁定。这也从侧面反映了我们的地球作为太阳的行星，仍然处于相当年轻的阶段。

地球自转变慢的两个内部原因——无规的地核运动和季节性的大气运动——可以这样理解：（1）角动量不变时角速度大小可以变化；（2）角速度的方向与角动量的方向可以是不一样的。

比如，花样滑冰运动员在做原地旋转动作时，其手臂向内收的同时，他自转的速度将会变快。只要角速度的方向不平行于旋转物体的主轴，角速度方向就会一直变化。考虑一个极端情形：你向上抛一根长细棒，让细棒沿着长轴方向高速旋转（细棒足够细的情形下，其贡献的角动量可忽略不计），然后再使细棒沿着垂直长轴的方向旋转上抛，此时角速度在空中必然是会发生变化的，而角动量是不变的。明白了这些，你自然能理解地球内部运动导致的自转速度变化。

最后，物理君还可以（滑稽地）提出一个能造成地球自转速度变慢的内部因素，这也是我们地球人都能参与的活动，那就是把靠左行驶的汽车全部改为靠右行驶，这样一来，一天的时间就增加[1]了。当然，这个所谓的一天时间变长是相对于汽车都停在原地不动的情形而言的，其变化也十分微弱。



05.为什么极光是绿色的？

首先我们需要知道，极光是来自地球磁场或太阳的高能带电粒子流使高层大气分子或原子激发而产生的。根据能量最低原理，激发态是不稳定的，被激发的原子等一段时间后（这段时间称为寿命）会释放出一定能量的光子，然后回到稳定的基态，这一过程中放出的光就是极光。而大气分子主要是由什么构成的呢？没错，主要是氮气和氧气。

根据我们上面的阐述，极光颜色主要靠激发态决定，也就是由大气分子的组成以及入射电子能量大小决定。当入射电子能量不太大时，氧原子容易被激发，最终产生的光波为557.7纳米的淡绿色光。而能量较大时，氮原子容易被激发，最终产生427.8纳米的蓝色光。能量很大的时候，630纳米的红光容易发出。

虽然高层内空气密度小，但是碰撞对于寿命长的态而言依然是有巨大影响的，比如，630纳米的红光寿命约为110秒，而处于这种激发态的原子，只要被其他原子碰撞，激发态就会改变，再跃迁回基态时发出的光的颜色也会随之改变，不会再是红光了。而557.7纳米的淡绿色光寿命为1秒左右。人眼可以观测到的较低层空气密度相对高层较大，碰撞较多，因此人们看到的极光多为绿色光。



06.太阳是个什么样的“火”球？

太阳的成分主要是氢和氦，也有少量其他元素；其能量来源主要是内部核聚变；太阳的结构就比较复杂了，从内到外有不同的区层，肉眼看到的可见光主要是从靠近外层的“光球”层发射出来的，温度为5000摄氏度左右（随位置变化）。从这个角度讲，它有点类似超高温火焰。光球包含很多种类的元素，具体成分可以从太阳光谱中推测，原理类似焰色反应。更外层的日冕温度极高，达到百万摄氏度，因而其中气体极其稀薄，且几乎完全电离。这些等离子体高速运动会带来磁场（太阳磁场来源不止一种）；磁场也会影响到等离子体的运动；离子和电子在磁场中的回旋运动和振荡还会带来各种电磁波辐射。另外，磁重联过程释放巨大的能量，也会带来一系列丰富的现象。

总之，把太阳比作火球，形象直观，但也过于简单——其中的物理现象要比普通的火焰丰富得多。



07.为什么地球的引力没法束缚氦元素？

题主这么问，显然是了解万有引力与逃逸速度的。

如果把空气中的分子想象成一颗微型的卫星，则当其速度大于第二宇宙速度11.2千米/秒时，就会完全脱离地球引力，飞向浩瀚的宇宙。考虑到室温附近气体温度与分子平均动能的关系，可推得方均根速率 $v = (3RT/M)^{1/2}$ ，其中 M 为分子的摩尔质量。这说明，总体而言，质量越小的气体分子，其运动速度越大。

尽管如此，氦原子速率每秒也就几千米，与第二宇宙速度还差很多呢。可是别忘了，气体实际速率是依概率分布的，这就是麦克斯韦速率分布，它拖着一条长长的尾巴；也就是说，有少量的分子速度可以很快。虽然这部分分子比例并不高，但是涉及地球演化的过程，时间尺度是很大的，经过亿万年的积累，这部分逃逸就很可观了。

当然，由于分子量不同，气体间的差异也拉大了。这也是地球大气层中氢气和氦气很少，而以氮气、氧气以及更重的气体为主的原因之一。再看看其他星体：月球引力太小，啥都留不住；火星呢，引力比地球小些，氮气、氧气容易跑，所以大气中主要的就是更重的二氧化碳了；而木星引力比地球大得多，其大气中存在大量的氢气和氦气。



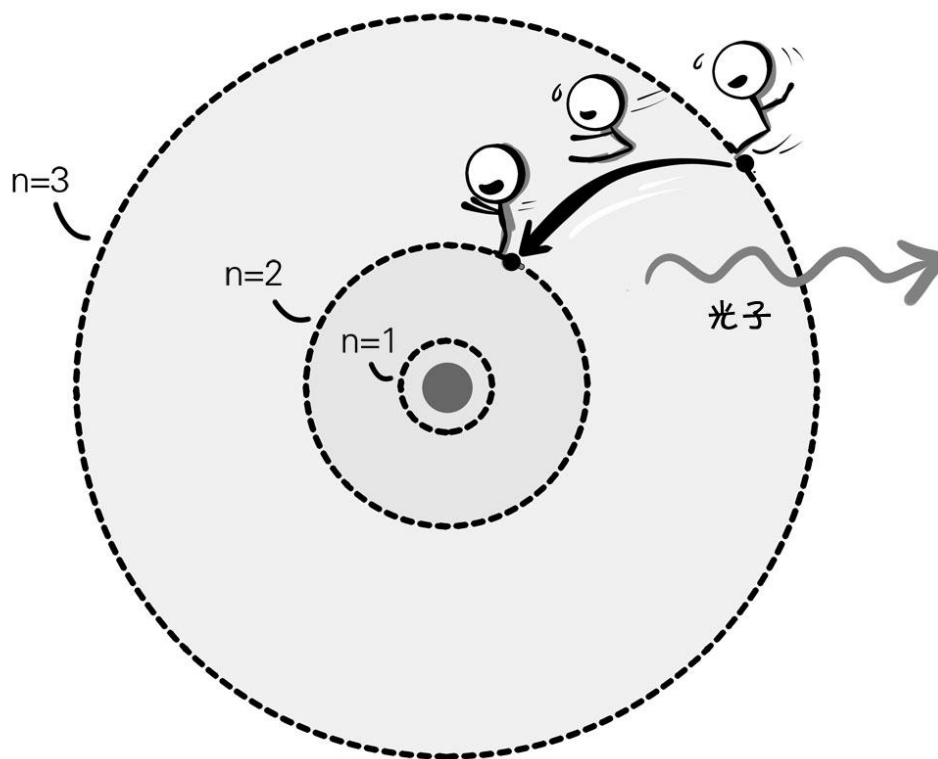
08.既然太阳主要是氢氦构成的，那阳光中的合成光线为什么是白色的？

对于这个问题，简单的回答是：太阳光谱是热辐射的结果，而不是原子跃迁的结果，而氢气燃烧的淡蓝光是原子跃迁的结果。

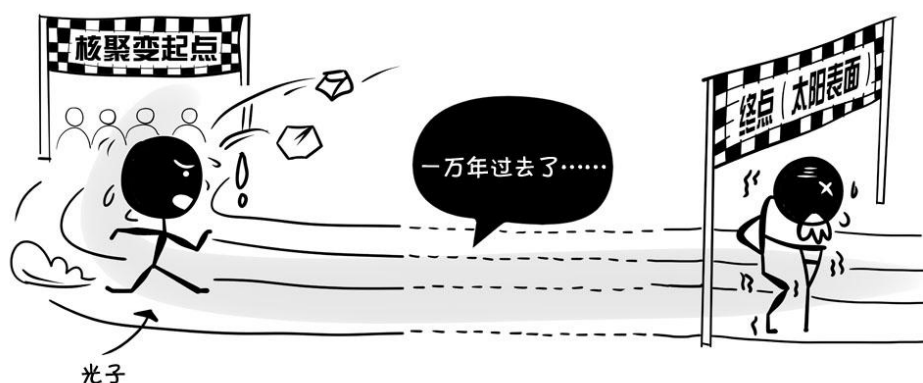
物体发出单个光子有多种层次，分子层次上的能量小，一般包括微波，原子层次上的一般包括近红外射线到近紫外线（包括可见光），原子核层次的一般包括X射线和其他射线。当然也有粒子因速度变化（例如碰撞）而发出光子的情况。

这是一个氢、氦或者别的元素发出光谱的问题，我想你是在考虑原子层次的发光。以氢元素为例，根据玻尔原子模型（围绕原子核运动的电子只能在特定轨道上运动），如果氢原子外面的电子从一个高能级轨道跃迁到低能级轨道上，那么就会放出一个光子来。例如电子从 $n=3$ 的轨道跃迁到 $n=2$ 的轨道，就会释放出一个波长为656.3纳米的光子（对应红光）。

由于每个原子跃迁释放的能量都是固定的，所以当它们的电子从高能级跃向低能级时，就会释放出特定的光子，每种原子都对应自己独有的一个发射光谱。宏观上说，我们看到氢气燃烧时发蓝光，钠离子呈黄色等，这是它们的特征谱。



反过来说，如果原子的电子从低能级跃迁到高能级，那么它就会吸收特定波段的光。假如我们用全光谱的光去照射氢气，从另一面收集到的光谱上就会有一些被吸收的线条，这正是之前氢原子发射光谱对应的光谱线。



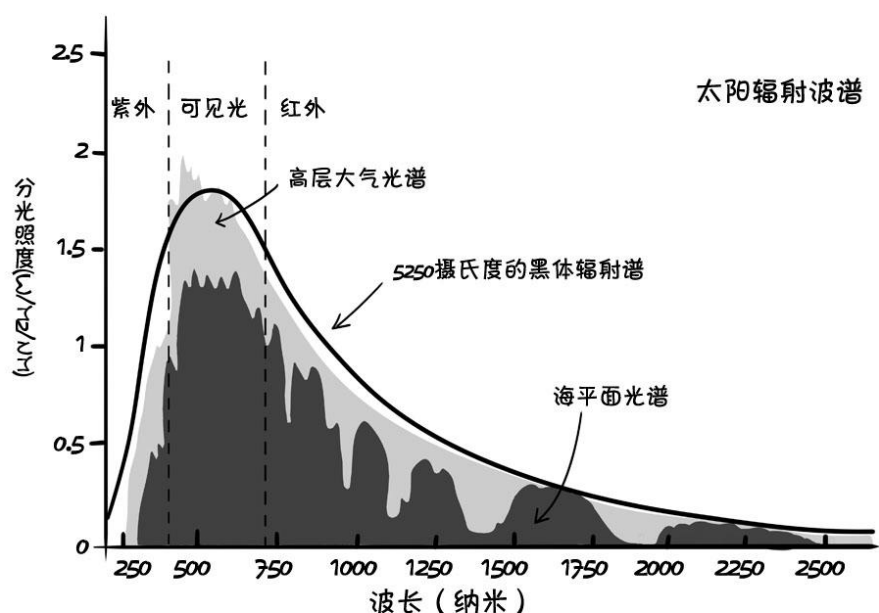
我们接下来考虑太阳的发光问题。这首先是发生在原子核水平上的。太阳之所以发光，从本质上说是因为它内部的氢核在高温高压下

发生了核聚变，四个氢原子聚变成了一个氦原子；由于四个氢原子的质量比一个氦原子的质量稍大，根据爱因斯坦的质能关系，减少的质量就转化为能量，以 γ 光子的形式辐射出去。但是太阳内部粒子的密度太大了，这些辐射出去的 γ 光子不断地与其他粒子碰撞。根据估算，一个光子若要从太阳发生核聚变的地方跑到太阳表面，平均需要几百万到一千万年。可怜的光子！经过百万年的“挫骨削皮”，它早已变得面目全非了。那么我们该如何考虑太阳发射出的光呢？

这要从统计的角度来考虑。按照目前的普遍看法，太阳是一个近似的黑体。所有照射到黑体表面的辐射都完全被吸收而不会反射，它发出的光线来源于其热辐射。所以只要有温度，黑体就会辐射出电磁波，电磁波的波谱服从普朗克定律。这就是所谓的黑体辐射。太阳表面温度为5000多摄氏度，下一页的插图显示的就是它辐射出的光谱。

灰色的是大气层上方的太阳光谱，黑线是5250摄氏度的黑体辐射，黑色则是经过大气层吸收后海平面上测量的太阳光谱。

我们可以看到，太阳光谱在可见光波段（390～700纳米）的强度是最大的。此外，在光谱上有“锯齿”，这是太阳表面大气中各种元素（例如氢、氦等）对光谱吸收的结果。



09.火箭在离开大气层后，朝后面喷射的火焰已经没有可以反弹的支撑物了，它在真空中为什么还能前进？

这位提问者拥有这种不会随着时间消失的好奇心，是一个值得羡慕的人。这个道理叫动量守恒。比方说，你坐在一个小船上使劲往后面丢一颗沉重的铁锚。在丢出去的瞬间，你站的小船会开始向前运动。而小船向前运动的原因并不是水在推动小船。

同样，火箭的尾部喷出大量的气体，并且这些气体温度很高，喷出去的速度非常快。它们就像丢出去的铁锚一样。这就是火箭前进的原因。

火箭转向的办法有很多，可以靠尾部发动机喷嘴角度的微调，可以靠从侧面喷出气体反推，可以靠陀螺效应。



10.为什么说飞船在轨对接不可以在同一轨道？据说是因为轨道相同，速度相同，所以追不上。但是处于后方的飞船为什么不可以向后点火加速的同时向地球外侧方向点火（加大向心力），或者让前方的飞船减速？

道理谁都懂.....可是你知道这要多花多少钱吗？中石油在太空中又没有加油站。多装几吨燃料上去往往意味着要多消耗几百吨燃料（这个数字不一定精确，总之很多就是了），而这都是小头，关键是装那几百吨燃料的额外的一节火箭还是一次性的。而这也是小头，关键是多加了一节火箭，原来的比推啥的全乱了，好吧，只能重新设计研发整个火箭了。所以这个动作非常非常不经济。

而且，这个动作的效果完全可以通过在地面上换个发射时间换个发射方式来搞定。所以.....是不是有点蠢？



11.如何计算地球的质量？

质量，是物体所具有的一种物理属性，是物质的量的量度，体现了物质的惯性大小。地球体积以及位置使得我们无法直接对其质量进

行称量，即使有着“给我一个支点，我能撬起整个地球”的豪言壮语，我们也无法在技术上实现这一伟大而艰巨的任务。在对地球质量进行测量时，我们需要利用间接测量的方法。

这里计算方法主要分两种，（1）利用质量与密度、体积的关系，通过平均密度对地球质量进行计算；（2）利用万有引力定律，通过地球与地球卫星的关系或地球上的物体所受重力来对地球质量进行计算，其中重要的一步是确定万有引力常数 G ，这就是著名的卡文迪许扭秤实验。

$$M=\rho V \quad (1)$$

$$G \frac{Mm}{r^2} = ma = 4\pi^2 mr \frac{1}{T^2}, \quad GM = 4\pi^2 mr^3 \frac{1}{T^2}, \quad M = \frac{GM}{G} \quad (2)$$

$$G \frac{Mm}{r^2} = mg, \quad M = \frac{gr^2}{G} \quad (3)$$

在公式（1）中，地球体积 V 可由技术测量决定，平均密度可由Schiehallion实验决定；公式（2）中的 r 为卫星运动半径， T 为其运动周期；（3）中 r 为地球半径， g 为测量点重力加速度。

在对地球质量进行计算的过程中，我们一般需要考虑地球大气层的质量，有时甚至还需要考虑陨石、大气层逃逸、全球变暖等因素的影响。目前地球质量测算的精确值为 $(5.9722 \pm 0.0006) \times 10^{24}$ 千克。



12.为什么地球公转的轨道是椭圆形而不是圆形？

开普勒在1609年发表了他的第一定律和第二定律，第一定律内容为：行星绕太阳做椭圆运动，太阳位于椭圆的一个焦点上。虽然开普勒定律是在大量的观测资料的基础上总结出来的，但是数学上可以证明如果地球仅受到来自太阳的力，这个力是有心力（始终指向太阳的重心）且力的大小与它们之间的距离 r 成平方反比关系，即 $F \propto \frac{1}{r^2}$ ，根据能量守恒和角动量守恒我们可以得到有心力作用下质点的轨道方程（以太阳为参考系，质量变成折合质量）：

$$\frac{h d\rho}{\rho \sqrt{\frac{2E'}{m'} \rho^2 + \frac{2mk^2}{m'} \rho - h^2}} = d\varphi$$

这个微分方程的通解为 $\rho = \frac{p}{1 + \varepsilon \cos(\varphi + C)}$ ，从这个解我们可以看出在有心力作用下质点轨迹是一条圆锥曲线，且偏心率 $\varepsilon = \sqrt{1 + (\frac{E' 2h^2 m'}{m^2 k^4})}$ ，当 $E' = -\frac{m^2 k^4}{2h^2 m'}$ 时，轨道为圆，而当 E' 小于0时，质点轨道为椭圆。很明显，轨道为圆的条件比椭圆严格得多。考虑到其他天体的微扰，大部分情形下，行星公转轨道更接近椭圆。不过太阳系八大行星轨道与圆都相当接近，地球轨道目前偏心率为0.0167，事实上这比你画出来的圆都要圆。



13.为什么围绕太阳公转的八大行星都在同一平面上？有没有可能出现相互垂直的轨道？

这个问题可以用星云假说解释。

一般的说法是，太阳系形成于一块星际云，这块星际云本身在形成的过程中就存在与其他星际云等其他物质的相互作用，尽管看上去可能很混乱，但整体具有一定的角动量。在引力的作用下，星际云的物质逐渐向中心坍缩，形成一个云盘，并且这个盘的平面大致垂直于整个星际云的角动量，来自盘上下的物质经过盘时通过物质的相互作用失去了大部分本来具有的垂直于盘的动量，因此整团星际云最终倾向于集中在一个吸积盘上。最后太阳就从盘中心的原恒星演化而来，而行星们则基本从这样的一个原行星盘上演化而来。这不仅能说明为什么我们太阳系的行星轨道基本在同一平面，行星们公转方向和太阳自转方向都是自西向东也可以得到解释。

当然，整个星际云并不是完全孤立的，来自外部的作用肯定参与了演化过程，但至少就目前的太阳系看来，相对星际云的内部作用，它似乎并没有扮演重要角色。另外，太阳系八大行星里面轨道倾角最大为七度左右，就目前所发现的行星系而言，似乎并没有两颗行星轨道相互垂直的情况。



14.宇宙是无限的吗？奇点大爆炸后形成宇宙，而宇宙是不断膨胀的，这是否意味着宇宙是有界的？界之外又是什么？大爆炸之前又发生了什么？

我只想说，题主刚好把两个关键词弄反了。

现在的观点认为，宇宙是有限而无界的。举个很简单的例子，一个球面，它的面积是有限的，但是这个球表面却是无界的。圆和莫比

乌斯带都是这样的例子。

宇宙之外是什么？很多学者认为宇宙可能不止我们置身其中的这一个，还有其他的，只是目前无法证实。那么这些宇宙之外又是什么呢？这个问题或许需要脑洞。

大爆炸之前又发生了什么——对于这一点，现在人们有很多观点。威腾认为，宇宙是凭“空”产生的，但这个“空”不是一般意义上的空。



15.既然光速是有限的，那么我们看到的多少万光年远的星球是不是这个星球多少万年前的样子啊？

定性地来说，是的，这就好比寄给异地恋女友的情人节礼物，她2月14日收到的礼肯定不是你当天发出去的。拿你现在的的时间减去信使（快递小哥，或者光子）一路上花的时间，就是信息发出的时间。

但精确考虑的话，这个问题就不太好回答了。为什么呢？上面之所以能够那样算，是因为默认我们都生活在一个经典的体系里，就是说世界各地全用同一个钟表，如果“上帝”老头伸手把这个钟停了，那么所有地方都将处于同一时间，就如同孙悟空喊了一声“定”，所有的事物都变成了雕塑，不管你是在喝水打哈欠，还是在嬉戏打闹，浮云不再飘动，浪花不再落下，太阳不再燃烧，银河不再旋转，那拂面的风也成了定格。但是相对论说了，其实每个物体都有自己的钟，是快是慢取决于这个物体的速度以及所处的空间曲率。如果那个星球正好

在一个黑洞附近呢？如果那个星球正高速运动呢？即使你知道光子在路上走了一万零一年，你也只能说A星是在地球的一万零一年前发出的，而不能说它是在A星的一万零一年前发出的。发出那个光子后A星上的人民到底过了多少年，还要看他们自身所在的系统，他们时钟的步伐和我们不一定一致。

空间近似平滑，相对速度又不是很大的情况下，还是可以用经典的方法来计算。火星人民表示异球恋还是很痛苦的，说一句话都要等十分钟。



16.既然宇宙中有无数颗恒星分布在地球的每个方向上，那么为什么黑夜还是黑的？

题主说的是奥伯斯佯谬，也就是所谓的“夜空黑暗之谜”。从理论上讲，如果我们的宇宙是静态的、无限的、永恒的，那么在任何方向上，我们都至少会看到一颗恒星，恒星发出的光在无限的时间内也总会到达我们的眼睛，那么夜空就不是黑暗的，而是无限亮的了。所以“静态”“无限”和“永恒”这三者不可能都对。科学家针对该问题对现有宇宙模型提出了很多见解：有人提出“永恒”不对（宇宙有开端），遥远星球的光还在路上；有人提出“无限”太荒诞（宇宙有大小），恒星不够多；也有人提出“静态”显然是自我欺骗（宇宙在膨胀），星体的光芒红移得看不见了。当然，主流学术界相信这三个特点一个都不对，其结论就是我们的大爆炸模型。

其实反观这个佯谬，还是存在很多不合理的假设的，比如，恒星一直在发光而不熄灭是不符合能量守恒的（第一类永动机之奥伯斯恒星版）。所以即使宇宙无限而永恒，在存在很多吸光物质的情况下，星光的平均能量密度不足以达到可见的程度（注意这和奥伯斯自己的解释不同，这里考虑了恒星的寿命）符合夜空黑暗这个既定事实。

（这和找不到的暗物质有没有什么关系呢？）当然，我们并没有回答夜空为什么黑暗。因为科学家不确定，所以物理君也不知道。不过，也许哪天题主能找到问题的答案呢？



17.宇宙中几乎有无穷多个星体，为什么地球没有被它们的引力撕裂？

在引力场很大且变化剧烈的情况下，物体除了改变速度，还可能因各部分受力不均而被“潮汐力”撕裂。如果不考虑靠近黑洞、中子星等致密天体而导致引力场剧烈变化，很少有能够撕裂地球的那种潮汐力。

其实，人类目前无法证明宇宙中的星体无穷多。即使有无穷多星体，我们也可以从另一个角度去看：根据现代宇宙学的基本假设，宇宙初期是近乎各处均匀、各向同性的，在相同的天体演化与结构形成的规律下，大尺度上，地球周围的星体是均匀分布的，对地球的总引力也是基本互相抵消的，能够明显影响地球运动的是小尺度（如太阳系）上的力。



18.恒星那么大、那么远，人们如何测出它的大小和质量？

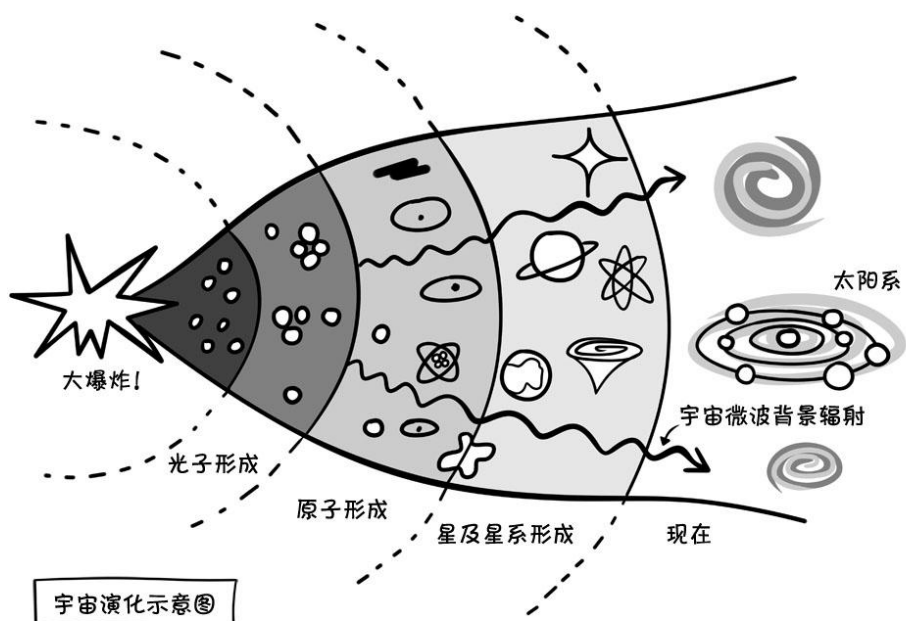
首先通过望远镜测量视星等（恒星看起来的亮度）与光谱，其次根据视星等与光谱直接得到恒星温度，而温度与质量有非常紧密的关系，因此对不同的恒星我们可以根据相应关系直接利用温度求出质量。然后，通过三角视差法、哈勃关系、标准烛光等方法我们可以测量出恒星与地球之间的距离，进而根据视星等与距离计算恒星光度。最后，对于一般的恒星，根据斯特藩-玻尔兹曼定律，光度与恒星半径平方以及温度的四次方成正比，我们由此可以解出恒星半径；对于较近且较大的恒星，我们也可以采用迈克尔逊干涉法、掩食法等方法直接进行测量。



19.宇宙微波背景辐射是什么？为什么人们能看到宇宙初始的样子？

根据现有的宇宙学模型，宇宙微波背景辐射的来源，要从宇宙最早期天地一片混沌时讲起。

大爆炸刚结束不久的时候，宇宙温度极其高，这样高的温度下重子物质还不能与电子复合，电磁波在这团带电的炽热的物质中无法自由穿行，经常会与周围物质发生相互作用。但是宇宙在膨胀，膨胀会降温，温度降低后电子与重子物质复合，光子就可以自由穿行了。



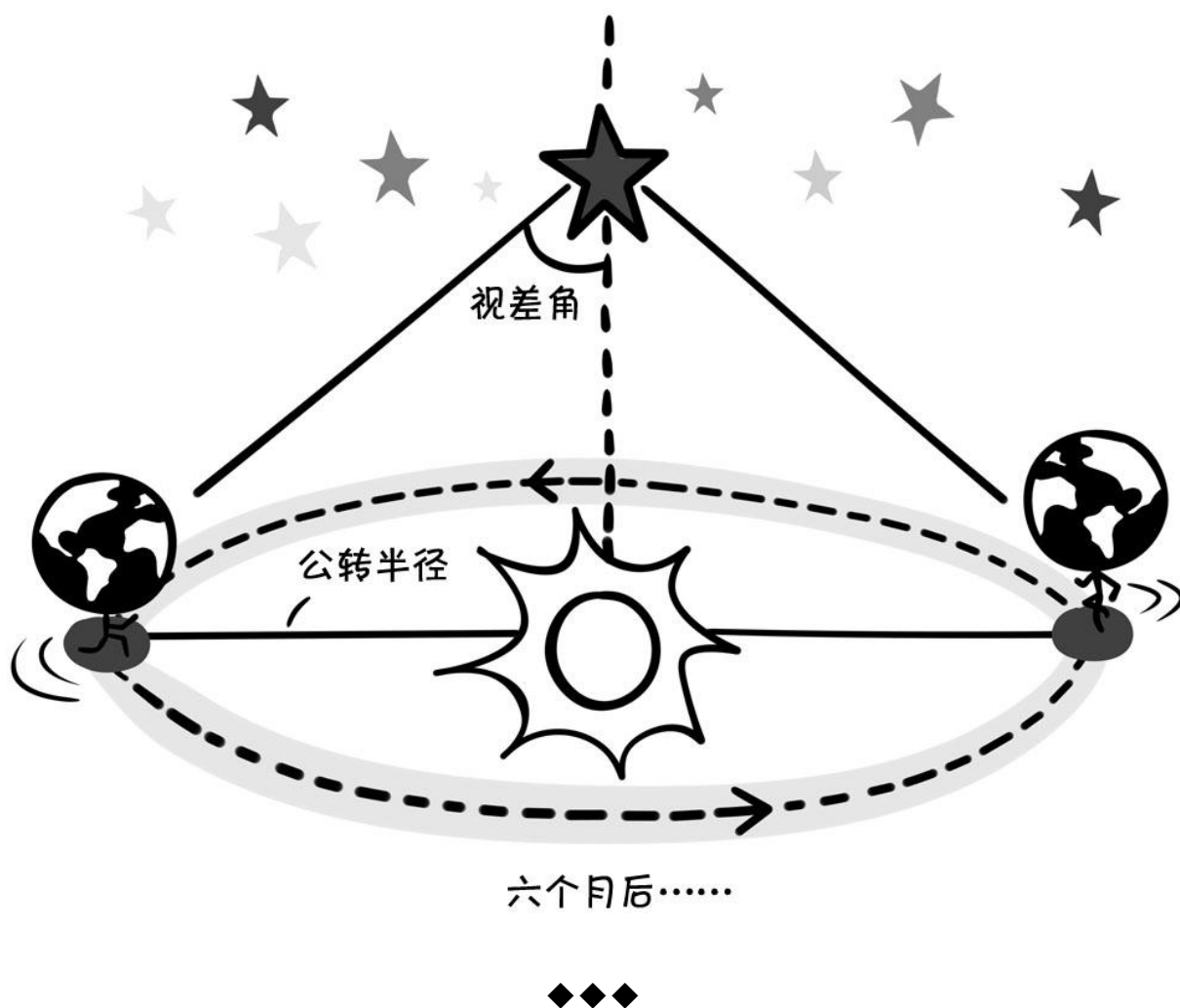
第一批被解放出来的光子弥漫整个宇宙，形成背景辐射，随着宇宙膨胀，这批最早的光子的波长也随着空间膨胀而拉长，其频率降低，现在宇宙背景辐射差不多在微波附近，这就是宇宙微波背景辐射（Cosmic Microwave Background, CMB）。在频率谱方面CMB是完美的黑体辐射，从角分布上看，CMB在大尺度上是各向同性的，从哪个角度看都差不多。但是探测技术发达以后，人们发现CMB的温度有很小很小的涨落，并不是哪个角度看上去都差不多，而很多有关宇宙的信息就包含在这各向异性的分布中。

从CMB形成开始，以后各种宇宙演化过程或多或少都会有CMB的光子掺和一下，宇宙极早期的一些过程，比如重子声学振荡（当重子与电子还没有复合时宇宙间传递的“声波”，声波的参数和宇宙早期的物质组分、空间曲率、初原涨落等都有关系），也会在CMB留下蛛丝马迹。因此CMB中蕴含丰富的信息。



20.我们怎样确定宇宙中天体的位置？我们怎么知道一个几亿光年远的天体在哪里？

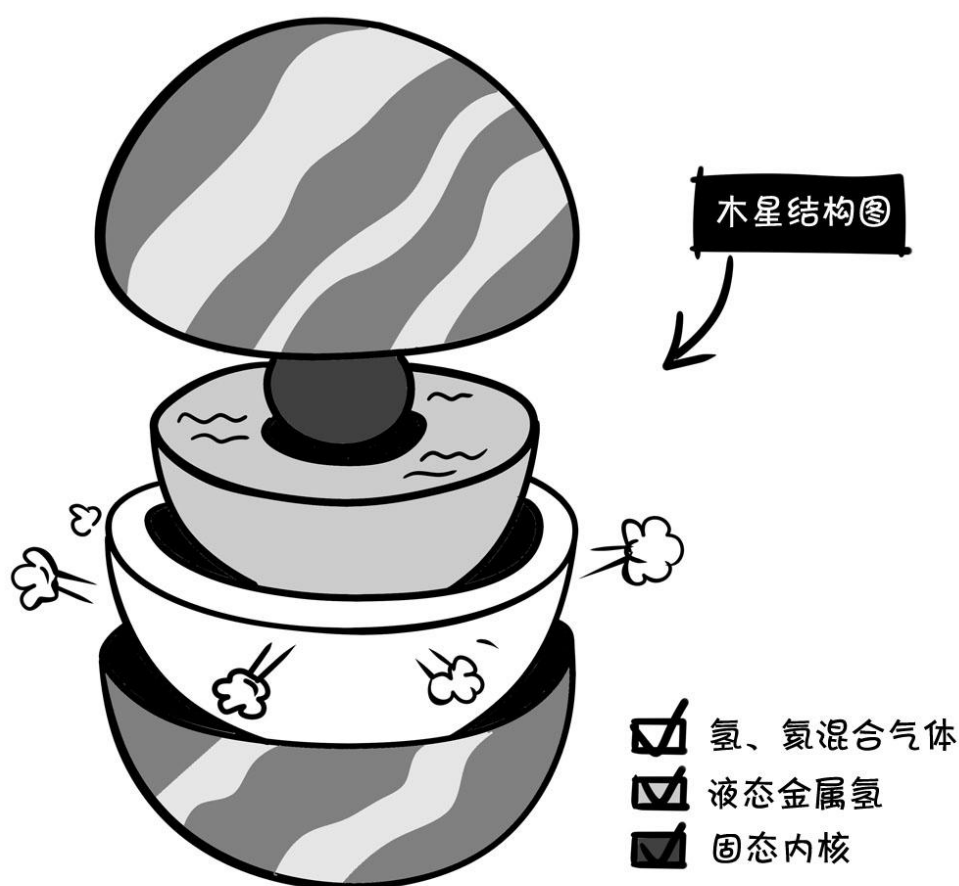
要确定一个天体的位置，我们需要了解它相对于我们的方位和距离。描述方位有很多方法，常见的赤道坐标系假设有一个包围地球的天球，然后把天体投影到球面上，用类似地球经纬度的概念给出天体在球面上的坐标。对于距离的测量，古老的传统方法是三角视差法，地球在绕太阳公转时，待测天体在天球上的位置在半年内会有一个角度变化，如果我们知道了地球的公转半径，就可以利用简单的几何关系测出天体的距离。对于更遥远的天体，我们可以利用超新星测距。一类Ia型超新星的光度是恒定的，可以用作标准烛光，利用观测到的亮度就可以换算出目标天体和我们的距离，所以它可以作为宇宙中距离的参照物。2011年诺贝尔物理学奖就授予了利用超新星测距发现宇宙加速膨胀的三位科学家。当然还有很多其他的测距方法，这里就不再一一叙述了。



21.请问气态行星真的都是气体吗？气态行星为什么没有变成固态呢？有纯液态星球吗？

气态行星当然并不只有气体，它只是外表看上去是气态的；气态行星的结构一般是，外层为气态分子，向内压强升高，分子凝聚成液态，最里面是固态内核。

例如木星，它外层是一层氢、氦混合气体，往内大概1000千米，逐渐由气态变成气液混合态，然后变成液态金属氢；液态金属氢再往中心下降大约木星半径的78%，里面有一个固态内核（不过目前内核的存在还属于模型猜测阶段）。所以严格意义上来说我们叫它气态行星并不准确，因为它大部分（无论是质量还是半径）都是固态和液态的。当然我们也可以这么来理解，气态行星就是表面只有气体的行星；而固态行星，像地球、火星，就是其表面有固态陆地的行星（事实上，我们知道地球内部是液态的熔浆）。



其实行星上的物质（从内核到外层）是固态、液态还是气态，取决于其组成物质、质量、压强、温度以及存在的环境等。在真空中，纯液态的星球是不可能存在的。只需考虑这一点，液态和真空之间需

要存在过渡。要么引力太小，液态分子渐渐扩散到真空中，挥发干净；要么在引力作用下，物体内部是液体，外层包裹着气体（就是木星去掉固态内核的那种情况）。一个误导我们认为纯液态行星能够存在的画面，我想应该是电影中飞船里飘浮着的水滴。但我们不应该忽略它存在的环境——飞船内压强是一个标准大气压。



22.新的星星是怎么形成的？宇宙不是倾向于通过熵增来演变吗？

新的星星就是指新的恒星吧。星际空间中充满了星际介质，而且星际介质的分布很不均匀，就拿银河系来说，大约一半的星际介质集中在2%的星际空间，这些相对致密的区域称为星际云。

在星际云的最致密的核心区，分子可以存活，这些暗云被称为分子云，新的恒星就起源于此。当分子云变得足够致密，质量足够大且温度足够低（使得压力足够低），自引力大于压力的时候，分子云就会发生坍缩，因为分子云密度分布不均匀，较致密的区域比其他区域坍缩得更快，就会裂变成很多分子云核，尺度数光月的分子云核就是恒星形成的种子。分子云核中心坍缩比外层坍缩快，中心与外层分离，由里到外一层接着一层自由落体坍缩，角动量守恒使得下落物质形成吸积盘，吸积盘供养中心正在成长的原恒星。质量为8%到10000%太阳质量的原恒星再经过一系列演化就会成为主序星（太阳就是一颗主序星）。

至于宇宙演化的方向问题，不太严谨地说，分子云在坍缩成原恒星的过程中，本身熵的确是减少了，但它还会不断地向外辐射能量，

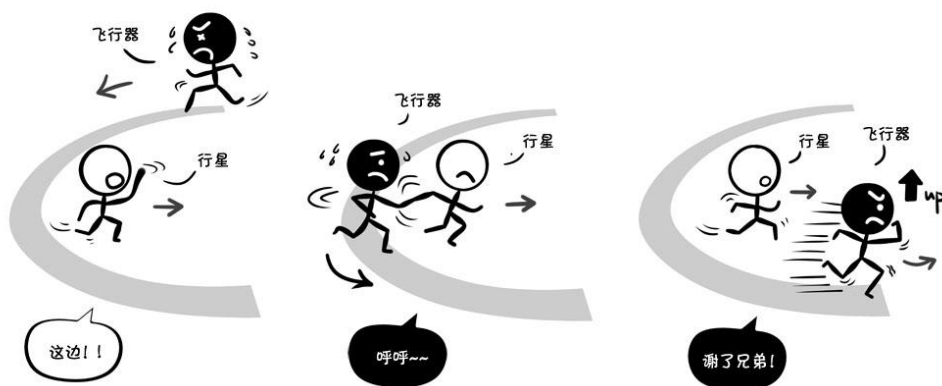
外部的熵增加了。更严谨地说，自引力系统可以推出其无法达到平衡态（整个宇宙就是一个自引力系统），故热力学不适用，也就谈不上熵增原理。



23. 引力弹弓如何实现加速？从能量守恒考虑，它的能量应该不变，有气体阻力时还会减小，那速度为什么会增大？

考虑能量守恒时，我们要考虑的不仅仅是我们要发射的“子弹”——假设这就是飞行器吧——还要考虑与其发生相互作用的“弹弓”。假设“弹弓”是一颗行星，这个两系统遵循能量和动量守恒。

我们从简单的推导可以得出结论，二者的相对运动速度不会发生变化，假设行星速度为 U ，飞行器速度为 V ，二者初始相向运动，那么相对运动速度为 $U+V$ ；待飞行器绕过行星，二者的运动方向同向，而行星的运动速度基本不变（其实略有减小，但可以忽略不计），那么飞行器的实际运动速度就变为 $2U+V$ ，如此便实现了加速。



当然，这只是一个简化的推导，不过我们所说的正是《火星救援》中NASA的黑人小哥所提出的救援方案。实际上引力弹弓效应的确被用来为航天飞行器加速，美国于1977年发射的“旅行者1号”探测器在经过木星和土星时便是通过引力效应加速的，2014年9月13日它终于飞出太阳系，成为首个冲出太阳系的人类制造的飞行器！



24.为什么地球等天体是圆的？

假设现在有个星球是正方体。

接着喜闻乐见的bug出现了——

如果说正方体的体心到面心的距离是 R 的话，那么正方体的体心到顶点的距离就是 $R^{1/3}$ 。也就是说顶点离星球的中心更远，引力势能要大于面心的引力势能。要知道，整个宇宙都是些懒家伙，能在低能量的状态待着就绝不愿意在高能量的状态待着。

正方体星同学寻思耍个性的代价有点高，于是伸个懒腰开始把顶点附近的物质慢慢往面心附近捏。顶点慢慢往里面凹，面心慢慢往外凸。

什么？没有手怎么捏？

好问题。我们知道万有引力定律，说的是行星上每一块石头、每一块泥巴都对你有一个引力。而所有石头、泥巴的引力的矢量和就是行星对你的引力。

对一个正方体的表面来说，引力的方向并不是处处垂直向下的。比如，你站在面心靠左一点的位置，你的右边就会比左边有更多的石头、泥巴。这样加起来的引力就会有一个分量把你往面心那边推。

所以，引力就是捏泥巴的手。什么？行星上全是固体物质，固体形状不能随便改变？要知道，固体形状不能随便改变这点小脾气，遇到质量足够大的行星时就是个战五渣了，引力作用高兴怎么捏就怎么捏。

而正方体君会一直捏一直捏，一直到不能再继续减小引力势能了为止。（引力势能差不足以弥补捏的过程中带来的能量损失。引力没有很快捏平一座山，因为现在的山都太矮了，不划算，引力不屑于捏。）

于是当正方体君心满意足地停止捏泥巴后，它发现自己变成了一个球。

（说明：本题答案原载于知乎，作者sym physicheng就是物理君本人，因此不构成侵权。）



25.为什么行星的光环总是在行星赤道上空？

行星环一般被认为是行星的卫星进入行星的洛希极限内被行星的潮汐力撕裂而形成的，也有可能是其本身就在行星的洛希极限内，因为行星的潮汐力而无法形成卫星。不论是哪种情况，行星环形成的关

键都是行星的潮汐力。行星的赤道平面上潮汐力最大，在行星潮汐力的牵引下，构成行星环的物质就会绕着行星赤道所在平面运动。



26.宇宙中目前已知的最高的温度是多少？在什么条件下产生？

不算宇宙大爆炸，宇宙中目前已知的最高温度在地球上，而且是人造的，它的值是5.5万亿摄氏度，制造方法是在欧洲核子中心的大型强子对撞机中把铅离子加速到近光速后再对撞。这个温度下即使质子和中子也会“融化”，变为一种叫作夸克-胶子等离子体的物态。



27.黑洞有温度吗？

这个问题大家不太熟悉，但是与它等价的另外一个问题，大家一定能栩栩如生地描述它，那就是黑洞的辐射问题。

这里还要再说一遍黑洞辐射的问题：霍金发现黑洞的能量可以注入虚光子，使得这一对伙伴远远地分开，其中一个光子坠入黑洞，而另外一个光子失去湮灭的伙伴。留下来的光子将从引力中获得飞离黑洞的能量和动力，在它的伙伴坠入黑洞时，它将飞出黑洞，这一过程在黑洞视界周围反复发生，从而形成了不间断的辐射流——这是考虑量子效应的结果——远处的观察者能观测到与辐射对应的温度，该温度由黑洞视界处的引力场强度决定。

这个问题的起源即是“黑洞熵”。根据广义相对论，黑洞内部应该是高度有序的状态，这显然违背了熵增原理。霍金在研究中发现，如果能为黑洞赋予一定的非零的温度，就能很好地解决这个问题。借助相对论和量子力学有限结合的部分，冗长的计算得到的最终答案是：黑洞有熵，也有温度。以三个太阳质量的黑洞为例，其熵约为1后加78个0，其温度约为 10^{-8} 开尔文。



28.为什么黑洞会蒸发呢？

因为根据量子场论，真空可以凭空产生正粒子-反粒子对。正常情况下产生的正反粒子对过一段时间后又互相撞到一起凭空消失，即湮灭。

但如果正反粒子对刚好产生在黑洞的边界上，那就有可能一个粒子掉进黑洞中，另一个粒子在黑洞外面。进入黑洞的东西永远不可能再出来，于是没有掉进黑洞的那个粒子就无法湮灭了，只能继续在空间中流浪。

这个过程的结果就好像宇宙中凭空多出来了一个粒子。事实正是如此，不过付出的代价是黑洞的等效质量少了一个粒子，相当于黑洞向外界蒸发了一个粒子。这就是霍金提出来的黑洞蒸发。



29.大恒星死亡后会形成黑洞，那么黑洞会不会死亡并形成其他天体？

会通过霍金辐射辐射出粒子并逐渐消失蒸发掉，不过速度非常慢，质量越大辐射得越慢。一个太阳质量的黑洞辐射等效的温度只相当于60个纳开尔文，也就是仅仅比绝对零度高了 6×10^{-8} 开尔文。而一个和月球同质量的黑洞辐射等效的温度差不多有2.7开尔文。这有多小呢？它意味着，像太阳质量那么大的黑洞要彻底蒸发消失，需要耗费 10^{67} 年，而宇宙的年龄大约才 10^{10} 年。



30.宇宙的年龄是130亿年。从宇宙诞生算起，光难道不能走130亿年吗？为什么我们能观测到的宇宙有970亿光年？

宇宙的年龄大约是130亿光年，这个时间是通过各种方法综合得出的，其中一种就是先寻找宇宙中最古老的白矮星，再考虑形成白矮星之前恒星的演化，以及恒星演化和宇宙诞生在时间上的关联，综合这些因素推算出宇宙的年龄是130亿~170亿光年。

而所谓的可观测宇宙是970亿光年，指的是我们最远能看见来自970亿光年远的地方发出的光子。宇宙是在不断膨胀的，根据哈勃定律，距离我们越远的东西膨胀的速度越快，且空间的膨胀速度是能超过光速的。（因为此过程并不携带质量和信息，所以不违反相对论。）这就使得光子在到达地球时，其光源的距离比它发出该光子时离我们的距离要远，所以我们能观测的最远距离比光速乘以宇宙的年龄要远。



31.什么是宇宙学红移？什么是引力红移？什么是多普勒红移？

多普勒红移是指，如果一个发光源一边发着光一边以一定速度远离你，那么你看到该发光源发出的光的频率就会变小（程度取决于这个速度有多接近光速）。

引力红移是指，一个光源从一个有很大引力的天体往外发射光线，这个光线的频率会变小，变小的幅度取决于引力的强弱。光线的频率变小意味着光线的能量变小，能量变小的原因可以认为是一部分能量拿去克服引力了。（这个说法并不严谨，因为在强引力场下定义引力势能并不是一件很简单的事。）

宇宙学红移是指，宇宙在膨胀，离我们越远的天体就以越快的速度远离我们，所以我们看到的它们发出的光的频率变小了。



32.在暗能量主导的宇宙中，宇宙会以近似指数加速膨胀。既然宇宙中任意两点间的距离都在不断增大，那为什么星系或者更小的结构不会被撕碎呢？

先科普一下弗里德曼方程。这是一个描述宇宙几何结构的方程。宇宙的任何一点都在以一定速度远离彼此，就像一个正在吹大的气球的面一样。不过，我们的宇宙是一个四维气球的三维面（如果不考虑

时间的话)。要注意区分束缚态和非束缚态哦。空间中的物质并没有被某个钉子钉在某一点，它们可以在空间中自由移动，当然，这依然要服从物理定律。对于束缚态的系统（比如单个星系），它自身并不会随着空间的变大而变大。如果还是觉得含糊，你就想象气球上放两个吸在一起的小磁铁，吹大气球它们也并不会分开。空间膨胀效应要通过互相自由的系统才能观察（比如相距遥远的两个星系）。



33.太空中的反物质是否能被观测到呢？如果可以，应该怎样观测？

我们知道，我们眼前所见的桌子、椅子、手机、电脑都是由原子组成，而原子是由质子、中子和电子构成，这些我们称为正物质。当然这么定义只是为了和反物质区别。而所谓反物质，即除了质量外，其他所有性质都和正物质相反的物质。

比如，电子质量是 9.1×10^{-31} 千克，电荷为 $-e$ ；它的反物质正电子的质量也是 9.1×10^{-31} 千克，但电荷却是 $+e$ 。质子、中子或者夸克等也都一样，我们还可以用反质子、反中子等合成反原子。

反物质和正物质（例如电子和正电子）一旦相遇就会湮灭，变成高能光子或者其他正反物质对。那这就有一个问题，茫茫宇宙中几乎全是正物质，反物质岂不分分钟被湮灭了？是的。按照现有的说法，宇宙早期CP被破坏，导致正物质比反物质稍微多那么一点儿。结果就是，反物质湮灭了，正物质还剩了一点儿，构成了我们现在的手、脚和大地。

那么太空中是否还有反物质呢？有的。虽然宇宙早期的反物质湮灭了，但太空中那些高能粒子相互碰撞的过程还是会产生反物质的。太空中的物质太稀薄了，反物质在与正物质碰头湮灭之前还能跑很远的距离，或者说能“活”好长时间。有多少反物质呢？不多，反质子只是质子的 $1/10000$ （GeV量级）。

介绍了这么多背景知识，现在来回答问题。反物质能不能观测？如果能，怎么观测？当然能，要不我们怎么知道它存在呢？最早的反物质（正电子）是通过威尔逊云室观测到的。方法其实很简单，加个磁场，一个粒子过去后，云室中的气体会被电离，描出一条轨迹。测一下轨迹半径，用笔算算，人们发现这个粒子质量、电荷和电子完全一样，只是它往左偏了，而电子是应该往右的。于是我们发现了正电子。

现在太空中有很多探测器，例如丁肇中主持研究的阿尔法磁谱仪，我们的猴哥“悟空号”，以及费米实验室等，其原理都差不多，只不过不再用云室，改成硅板了。



34.宇宙膨胀，距离越远的星系退行速度越快，请问这个退行速度可以超过光速吗（尽管空间膨胀和相对运动不是一回事）？

这是可以的。而且由于超光速无法传递信息，所以那些星系我们再也看不到了。我们能够观测到的宇宙是有一个范围的。



35.中子是电中性的，但是中子星的磁场是哪里来的呢？

中子虽然是电中性的，但是实验发现中子内部是有非中性的电结构的，概括来说中子主要由3个带电的夸克构成，夸克在中子中不断“运动”进而产生磁场。因此，中子带有非零的磁矩（约为 -9.66×10^{-27} 焦耳/特斯拉）。中性的原子甚至宏观物体（比如磁铁）的磁性也源于其中的电结构。

虽然说中子本身具有磁矩，但是对脉冲星（中子星的一种）的观测发现，脉冲星的磁场之强远非仅靠中子磁矩能够达到。这其中必然有其他的磁化机制存在。（目前人类观察到的中子星表面磁感应强度甚至可达千亿特斯拉，而实验室中2018年的最新纪录也仅仅是1200特斯拉的脉冲磁场。）中子星虽然名为中子星，但是中子星里面还是存在一些电子和质子（占十几分之一的质量），并且其中的电子是相对论性的高度简并电子，在费米面附近的能态密度远远大于非相对论性电子。这些电子才是中子星强大磁场的主要来源（至少现在的理论是这么认为的）。中子星的强磁场主要源于在前体恒星磁场诱导下相对论性强简并电子气的泡利顺磁磁化。

综上所述，中子虽然是电中性的，但是中子仍然拥有磁性；虽然中子拥有磁性，但是中子磁矩并不是中子星磁场的最主要来源。

参考文献：<https://www.smithsonianmag.com/smart-news/strongest-indoor-magnetic-field-blows-doors-tokyo-lab-180970436/>。



36.把一个速度非常接近光速的粒子射向黑洞，那么这个粒子的速度是否有可能超过光速？在狭义相对论中，具有静止质量的粒子无法被加速到光速是因为质量会增大，但是如果把一个速度非常接近光速的粒子射向黑洞，因为引力质量和惯性质量是一致的，这粒子仍然有很大的加速度，所以它有可能超过光速！请问这个想法哪里出现问题了，有没有关于这个问题的文献？

物理君必须说，这个问题提得非常好！这也许是我们目前收到的问题中最好的一个。物理君要表扬题主这种充满想象（但又没有无视科学原理）的思辨。

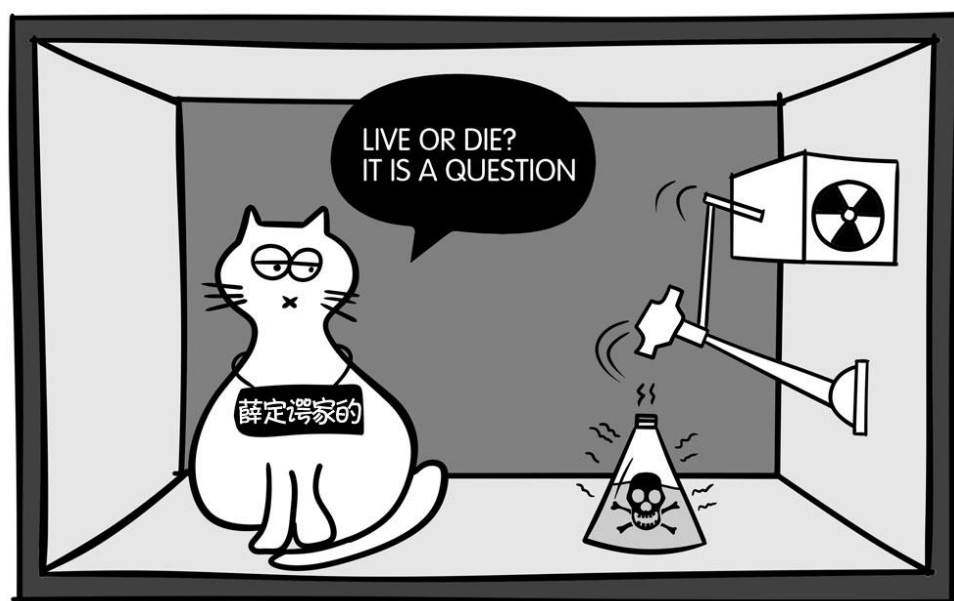
这个问题在狭义相对论中是无法解决的。你必须到广义相对论里面去，考虑黑洞的引力场对时空的弯曲。事实上，如果你站在一个远离黑洞引力场的静止参考系中看另一个人以近光速掉进黑洞。他越接近黑洞，视界相对你的时间流速就越慢，所以你事实上看不到他超光速。相反，你会看到他越来越慢地掉入黑洞，甚至在视界上完全静止下来。也就是说，由于引力效应，在你的参考系中，他要花无穷长的时间才能掉进黑洞。

而在他自己的参考系中，黑洞相对他近光速运动，他会在有限时间内掉入黑洞。而且他看到的黑洞也并不会超光速运动。你要记住，速度是矢量，现在是弯曲空间，比较弯曲空间中不同点的矢量要格外小心，不能直接照搬平直空间中的结论。

量子篇

01.网上说薛定谔的猫既死了又活着，那么薛定谔的猫的意义到底是什么？

微观粒子具有波粒二象性，在量子力学中用一个波函数来描述。而波函数具有一个重要的性质：它可以展开成若干个本征状态的叠加，这叫作态叠加原理，就好比一个粒子可以既是自旋向下的状态又是自旋向上的状态。这是一种很难直观想象但是却被无数实验证实了的微观世界的特征。在薛定谔的猫的实验中，某个粒子处于衰变与不衰变的叠加态，而实验仪器规定一旦粒子衰变则释放毒气将猫毒死。所以既然粒子可以处于衰变与不衰变的叠加态，与粒子衰变绑定在一起的猫的生命是不是也就处于生和死的叠加态了呢？



必须澄清，用现代的观点来看，薛定谔的猫是一个比喻性大于严肃性的思想对象。态叠加原理虽然也可以直接运用到宏观物体上，但我们通常不这样做。不这样做的原因是量子叠加，量子纠缠这些现象其实非常脆弱，需要非常小心地保护。宏观物体时时刻刻与环境进行无法避免的相互作用，这些相互作用会很快破坏掉脆弱的量子态。一个宏观物体哪怕一开始处于量子叠加态，它的量子叠加态也会迅速因环境相互作用的扰动坍缩掉。这个时间尺度是极快的，快到人根本无法察觉。这个过程叫作宏观物体与环境作用的热退相干。也正因如此，量子力学虽然一直是对的，但你在现实生活中从来就不会看到一只猫处于死活叠加态。

这是一个初期提出来时非常生动且非常有启发性的物理学比喻，但由于过于生动，后来反而误导了不少非专业人士。为薛定谔老师擦把汗。



02.什么是量子纠缠？

要理解量子纠缠态，首先你要理解什么叫量子叠加态。在经典物理里，事物都有确定的状态。一个物体在A点，那么这个物体就不会同时处于B点。但在量子力学里，物体可以同时处在A和B两个不同的点。这种状态就叫作量子叠加态。此时，我如果对这个物体的位置进行精确测量，那么这个物体会随机出现在A和B中的一个点。这个过程叫坍缩，对应外界测量（扰动）改变叠加态概率幅的分布。

至于量子纠缠，以两个物体为例，比如两个电子，如果我们说这两个电子处于量子纠缠态，那就意味着当我们对其中的一个电子进行测量（扰动），改变了这一个电子的量子态时，另一个电子的量子态也立即发生变化，尽管我们并没有对另一个电子进行测量，而且这两个电子可能相距非常远。

需要特别提一下的是，量子纠缠是瞬时传递的，没有光速的限制，但由于量子纠缠无法传递信息，所以量子纠缠并不违反相对论。



03.处于量子纠缠态的粒子可以在瞬间传递自旋信息，那么它们能不能传递能量？

量子纠缠态是不能传递信息的，更不必说能量了。纠缠态能够瞬时改变的是波函数的状态。这是两个概念。

比如，有两个处于纠缠态的粒子，一个在地球上，一个在天狼星上，两个粒子都可能自旋向上或者自旋向下，但出于某些原因，两个粒子的总自旋一定为0。如果我们通过测量发现地球上的那个粒子有向上的自旋，那么有些说法会说，这时候天狼星上的那个粒子的波函数瞬间从既可以向上又可以向下的状态变成了只能向下的状态。

这个过程叫作波函数的坍缩。

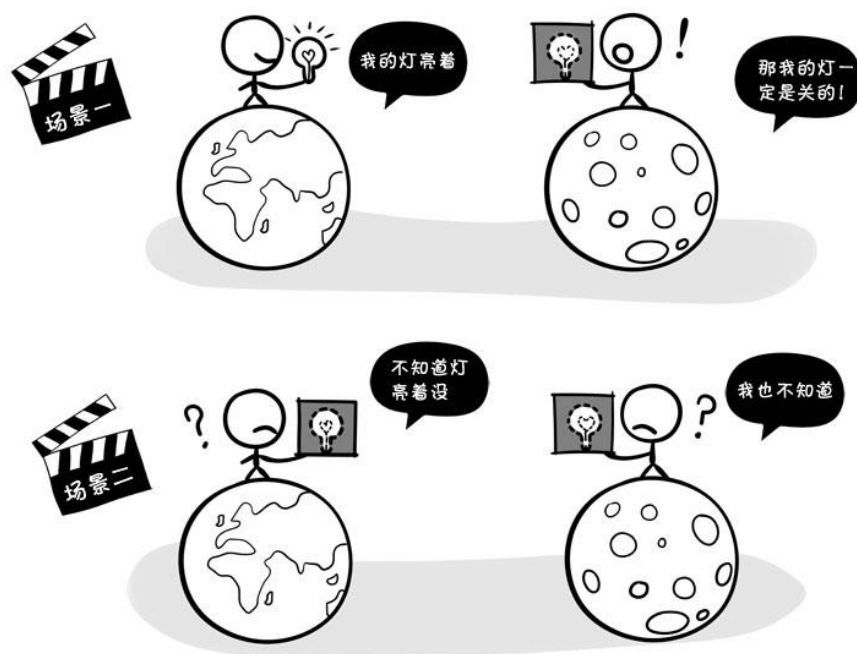
但是请千万注意，波函数本身并不能被直接测量（能被直接测量的是它的模平方），所以它并不直接对应一个物理实在。因此，它的坍缩并不是那种真有什么可观测物体“轰的一声垮掉”的过程。说得准

确一点就是，这不会产生任何可观测的效应。不能产生可观测效应，这自然就不能传递信息，于是也不违背相对论的限制（信息传播速度不能超过光速）。

我们可以再说清楚一些。信息到底是什么？信息就是一种能够把一个大集合映射到一个小集合的有用的“知识”。比如，“物理所在保福寺桥”这句话就是信息，因为它把物理所从宇宙任何地方映射到了保福寺桥。再比如，“比赛赢了”也是信息，因为“输/赢”映射到了“赢”。

我们来看一下纠缠态为什么不能传递信息。比如，我坐在天狼星里，想知道奥运会中国赢没赢，我心想，这隔着几光年呢，只能用量子纠缠看转播了。我跟地球那边已经约定好，我测到自旋向上就表示赢了，自旋向下就表示输了。既然波函数是瞬时坍缩的，我测一下我的自旋不就立刻知道输赢了吗？但问题是，地球那边并不能调控自旋是向上还是向下。地球那边测到什么自旋是完全随机的，而且这个随机性是量子力学自带的，没有任何办法消除掉。所以，虽然有约在先，但地球那边并不能操纵自旋的观测结果，所以我在天狼星上测到的自旋朝向并不能缩小“输/赢”这个集合，没有任何信息，只能乖乖地等八九年后光线传过来了。

（最后再说一点，虽然波函数不对应真实物理，但纠缠效应是客观存在的。这个有贝尔不等式做证明。）



04.量子计算的原理有没有通俗的解释?

哈哈，这个问题透着高冷啊。那么小的就来尝试着给您通俗地解释一下吧。

传统计算机的基本单位是二进制的比特0和1。实际系统中用高电平表示1，用低电平表示0，我们把这些高低电平反复通入与门、或门、非门这样的逻辑电路中，让初始的01011110.....在逻辑电路中不停地演化，这样我们就实现了一次经典计算。

在经典系统中我们用电平的高低来表示0和1，那么系统要么处于1，要么处于0。量子系统就不同了，在量子系统中我们用量子态来表

示0和1，而量子态是可以叠加的。比如我们用态 $|a\rangle$ 表示0，态 $|b\rangle$ 表示1，那么态 $|a\rangle+|b\rangle$ 就表示既0又1。这样有什么好处呢？好处太大了！比如给你两个既0又1的量子比特。把它俩的态再量子纠缠在一起，那么它们就有00、01、10、11四种可能的状态。你把这样的量子比特通入逻辑电路中，相当于同时做了00、01、10、11四组经典比特的计算。如果你把三个量子比特纠缠在一起，那就相当于同时做了8组经典比特的计算。如果纠缠四个量子比特，那就相当于16组。量子态是可以叠加的，所以一次量子计算就能够对应很多次经典计算，原则上可以实现指数级的运算加速，但把很多量子比特纠缠在一起极端困难，所以目前技术上还有很多障碍。



05.什么是量子比特？什么是量子干涉？为什么会有量子干涉？

我们首先考虑经典的硬币问题，将正面的面积定义为1，反面的面积定义为-1，硬币正面法线方向和观测方向的夹角定义为 θ 。不难发现，这个硬币面积沿任意方向观测到的面积投影为 $\cos\theta$ 。但是量子世界的硬币并不是这样的，在任何方向观测到的面积投影不是1就是-1，只存在这两个值，没有介于-1和1之间的值。然而，对多个同样的硬币进行观测时，平均值将趋于 $\cos\theta$ 。这样的“量子硬币”就是量子比特。有人问，这怎么可能呢？可是这才是量子世界啊。

量子干涉也并非量子世界特有的现象，干涉是所有波都具有的性质。只不过量子干涉的波不是可以直接看到和触摸到的，而是概率波，数学上用波函数表示，其模的平方表示找到粒子的概率。当我们计算两列概率波叠加找到粒子的概率时，要先将波函数加起来再平

方，而不是直接计算概率（平方）的和。这样得到的多余的项是干涉效应的直接数学解释。

我们没有回答为什么量子比特是这样的，也没有回答量子干涉的根本原因。但是科学家清楚如何精确地运用数学描述这一反常于直觉的现象。不过应当说，随机、纠缠、非定域等这些奇奇怪怪的特性正是量子世界的本质特点，与我们描述它的工具无关。



06.电子为何能从一个能级轨道跃迁到另一个而不经两者之间的区域？

首先，电子的跃迁是典型的量子力学效应。而一旦涉及量子力学，我们就需要抛弃很多经典的概念，包括经典粒子与经典轨道的概念。根据海森堡不确定关系，一个粒子不可能同时具有确切的动量和坐标，即没有轨道的概念。造成这种情况的原因，我们大概可以认为是微观粒子的波粒二象性，即微观粒子并不像宏观的粒子那样看得见摸得着，它同时也是一种物质波，所以经典的轨道概念并不适用于微观物理（当然宏观粒子也有波粒二象性，但是其波动性太弱，完全不用考虑）。所以，在量子力学中不同的能级并不代表不同的“轨道”，而是代表粒子具有不同的能量以及相应的波函数（波函数描述粒子在某点出现的概率密度，因此原子周围的电子会呈现出电子云）。电子的能级跃迁是指电子从一个能量本征态跳到另一个能量本征态，而并不需要从一个“轨道”跳到另一个“轨道”，只是跃迁后的电子云形状会有所改变。



07.让夸克带上颜色有什么意义？为什么引入色荷这个概念？色中性又代表了什么？

这纯粹就是物理学家的心血来潮。首先，夸克这样的微观粒子是没有颜色的概念的。这么设定可能是因为恰好有三原色，三原色合在一起恰好又是白色吧。所以想象力丰富的物理学家们就借用了颜色，来表示夸克有三种色荷，三种色荷的三个夸克束缚在一起形成色禁闭，组成色中性的质子、中子等。

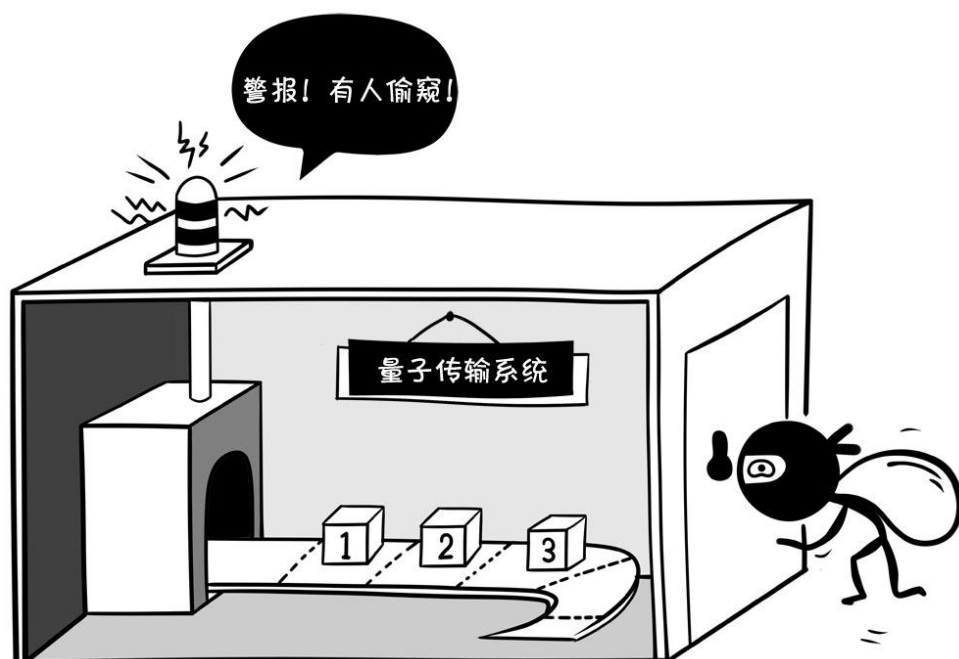
（物理君感觉自己讲了个冷笑话。）



08.量子通信“绝对保密”应该怎么理解？

量子通信中有一个很基本的定理叫作量子不可克隆定理。它的意思是一个量子态不可能复制成一模一样的另一个量子态而不对原来的量子态产生影响。

窃听恰好就是一个复制过程：接收原始信息——窃听信息——将窃听到的信息复制再继续发送。



在经典情况下，信息的发送者和接收者无法察觉信息在传输的过程中有没有经历过窃听，所以存在着泄密的风险。

而在量子通信中，由于量子不可克隆，一个信息在传输途中遭到窃听，原来的量子态一定会发生改变，所以窃听者无法复制出一模一样的原始信息发送给接收者。这样接收者和发送者一核对马上就能发现信息遭到窃听的痕迹：发出端的量子态和接受端的量子态不一样。于是他们就可以及时地更换密文或者更换传输通路，实现通信的“绝对保密”。



09.能不能用通俗的语言描述量子力学和相对论的矛盾点？

量子力学已经可以和狭义相对论相处得很好了，这里的矛盾主要指的是量子力学与广义相对论的矛盾，也就是引力理论与量子理论的矛盾。

技术上，把引力强行量子化的时候会有不可重整化的困难，很多物理量会变得无穷大.....

观念上，量子理论中引力是相互作用，靠玻色子传播，广义相对论中引力是时空弯曲。

广义相对论中时间和空间具有等价性，可通过洛伦兹变换相互转化。量子理论中时间是参数，空间是算符，时间和空间的数学结构都不一样。



10.量子是如何过渡到经典的？

这个问题可以由不同的角度去理解。

第一个角度是动力学方程的角度，量子的算符运动方程满足海森堡方程，进一步取平均值之后，我们可以得到平均值的动力学方程，这个经典的动力学方程是对应的，这就是所谓的Ehrenfest定理。

第二个角度关乎经典的运动轨迹，我们知道量子力学中，坐标动量是不对易的， $[x, p] = i\hbar/2\pi$ ，所以我们看到，在 \hbar 趋于0的时候，坐标和动量就变得对易了，所以我们可以同时确定粒子的坐标和动量。也就是经典的运动轨迹。

如果从路径积分的角度去理解，在 \hbar 趋于0的时候，在最稳相近似下，所有的非经典轨迹都会相消，最后只留下经典的作用量所决定的轨迹。

最后补充一点，其实大家普遍相信在 \hbar 趋于0的时候，量子会过渡到经典，但是这对应的具体情况，我们并没有完全理解，比如，我们不知道在量子混沌中， \hbar 趋于0是如何过渡到经典混沌的。



11.在测量一个粒子的状态之前，科学家如何知道这个粒子的状态不确定？

这涉及量子力学的基本原理，也关系到对“测量”这个概念的理解。其实无论是经典测量还是量子测量，在测量以前，如果我们对被测对象缺乏必要的信息，我们是无法知道该对象的状态的（包括一个物理量是否是一个确定值），只不过我们认为经典情况下，被测对象的所有物理量在测量前后都是不变的。

然而，进行量子测量的时候，粒子坍缩为所测物理量的本征态，之前的态在测量的瞬间被改变。这个时候我们才知道哪些物理量是确定的，哪些是不确定的。所以可以这样讲，因为我们知道哪些物理量是确定的，所以我们才知道哪些物理量是不确定的，又是怎么不确定的（量子特性使得一个物理量是确定的，另外一个未必是确定的，比如位置和动量）。我们可以事先制备好一些相同的态进行测量（这样的测量仍然有意义，因为我们可能无法直接获知测得某个值的概

率)。而制备的过程，本质上也是测量的过程，即，测量一个物理量，使系统坍缩为一个该物理量的本征态。



12.相对论和量子力学在现代社会的应用有哪些？

相对论的日常应用是GPS定位。GPS定位的原理是不同位置的GPS卫星收到相同信号的时间不同，利用时间差和简单的几何可以定位信号源的位置。但根据广义相对论，轨道空间中飞行的GPS卫星和地球表面的时间运行速度并不一样快，所以GPS卫星定位技术必须考虑相对论效应。

量子力学的应用多了去了，它应用于所有的芯片！你能想象现代社会没有芯片吗？



13.爱因斯坦与玻尔关于“上帝掷不掷骰子”问题的争论，最后貌似是玻尔的量子论更胜一筹，请问为什么人们只知道爱因斯坦而不知道玻尔呢？

我相信，爱因斯坦比玻尔更著名的原因有很多。第一点，爱因斯坦的学术成就的确比玻尔高。20世纪有两大物理学革命：玻尔带着海森堡、薛定谔、泡利和爱因斯坦、德布罗意、狄拉克、普朗克这一堆

人一起（初步）完成了量子力学革命。另一边，爱因斯坦一个人完成了相对论革命。你说这让人怎么受得了。

第二点，对大众来说，相对论本身比量子力学更好理解，更容易接受，结论也更颠覆常人的世界观。

相对论：“空间弯曲，时间变慢，星际旅行，质能转换。”

（大众：“666，不明觉厉！”）

量子力学：“猫同时既是死的又是活的。”

（大众：“你是不是傻？”）

第三点，“二战”末的某个军事行动和“二战”之后的冷战对峙以及20世纪60年代核物理的高速发展，使得原子弹几乎成为当时的一种流行文化（你们知道比基尼最早是一个核爆试验场的名字吗？）， $E=mc^2$ 成为一个家喻户晓的物理公式，而缔造这个公式的爱因斯坦几乎成为大众心目中智慧的化身。再加上他老人家那极具辨识度的发型，俨然是一时的“时尚教父”。

最后说一点，爱因斯坦反驳玻尔时提出了一个EPR实验。后来证明爱因斯坦在EPR上的主张是错的，但EPR本身又成为了一个学科（量子通信量子信息）的源头。也就是说，学霸的错误都是对我们人类的巨大贡献。你说这让人怎么受得了？



14.量子通信是基于量子纠缠的，是不是保护好这对量子就可以杜绝干扰和破解了？

的确，很多量子通信协议需要用到量子纠缠的性质，所谓的量子纠缠就是两个粒子间的非局域关联。量子通信的安全性是由量子力学的基本原理所保证的，是绝对的安全，与用于通信的纠缠对是否有被很好地“保护”基本没有什么关系。

根据量子力学原理，我们知道一旦对一个量子态进行测量，该量子态就会坍缩，即该量子态会被破坏。也就是说，当我们的量子通信信道被窃听时，该通信信道的原始信息就会被破坏，所以我们一旦发现信道中的信息被破坏了，我们也就知道信道被窃听了（例如，我们在通信时可以在通信信息中插入一些测试信号来测试信道是否安

全)。另外，绝对地杜绝纠缠对被干扰是不可能的，因为我们用于通信的粒子必须处于一个环境，无法做到完全将其孤立起来，而一旦有了环境，该粒子就会与环境相互作用，从而使其量子态退相干，因此我们必须在量子态退相干前对其进行操作。现代的实验手段可以通过各种技术来延长通信粒子量子态的退相干时间，但无法做到完全没有退相干。



15.量子通信技术可以像现在的电磁通信一样实用化吗？普通市民能不能用上量子通信技术的手机？如果能，可以预见哪些新奇的功能呢？

量子通信主要的优点是，因为量子不可克隆，所以量子通信可以在理论上杜绝信息被窃听的可能性。

如果这里有什么民用新奇功能的话，那就是绝对的隐私安全，以及贵得非常感人的流量包。哈哈！



16.量子计算机将如何改变世界？

未来，高性能的通用量子计算机（现在的量子计算机为专用机）将最先出现在科研人员的手中。当量子计算机出现的时候，就是现有加密体系失效的时候。除此之外，由于对微观状态有着非常好的模

拟，无机化学，甚至整个化学，逐渐并入到物理学中。量子计算机超强的性能，会让那些与信息处理密切相关的学科，如生物信息学，获得较大发展。当然，如果这个时候可控核聚变还没有完全实现的话，相信量子计算机也会对此产生不小的推动。

在商用的量子学计算机出现并普及后，商人们能及时知道价格的波动。他们希望收集足够的数据来分析对手的行为，同时尽可能地隐藏自己的行为。这样的世界容易产生机器依赖主义，但同时产生的还会有反机器依赖主义。

在个人量子计算机出现并普及后，人们将享受更为便捷的生活。比如你才输入一个字，你的机器就会预测出你最想查找的东西，这个预测大部分情况下会是准确的。各种各样的电器则通过网络与一台服务器连接在一起，使用服务器进行计算。

当人类与量子计算机的往来日渐加深后，有关量子计算机的思想将进一步渗透进工程计算领域。一些新的基于量子计算机的算法会被逐渐开发出来，物理将成为程序猿们的一门课程。

借助量子计算对人类脑部行为的分析和模拟，大脑最底层的规律（虽然这些底层规律与表象还未联系在一起）也许会被发现，不少人尝试做出脑机接口。基于对蛋白质功能的深入了解，人们甚至做出了可植入的计算机。从此，人类的思维能力不断提升，可植入计算机最终被写入基因当中。

（PS：以上内容是脑洞出来的，希望大家和我们一起大开脑洞！）



17. 什么叫费米面的嵌套（nesting），研究它的目的是什么？

用一句话回答的话，就是费米面嵌套指的是两套费米面的全部或部分区域可以通过在倒空间移动一个波矢而重叠在一起，其目的是解释一些体系中的相变，包括铁磁、反铁磁、铁电、电荷密度波等。

这一概念是从人们试图理解巡游电子体系中的磁性时开始有的。在很多情况下，一个材料的磁性是可以通过晶格格点上一个个局域的磁矩的行为来理解的。比如，顺磁对应磁矩随机排列，且在时间上指向随机变化，铁磁对应磁矩沿同一方向排列，而反铁磁则对应相邻磁矩反向排列。但是人们逐渐发现，在很多磁性材料中，电的行为是“金属的”，也就是说电子一定不是局域的。那么显然，电子携带的磁矩也不会是局域的，人们自然没办法从局域磁矩的角度解释为什么这些材料还会存在着磁性。

在这些体系中，我们可以清楚地观察到费米面的存在，如果我们把磁有序在倒空间的波矢放在其中一套费米面的某一点，就会发现该波矢连接到费米面的另一点。也就是说，如果我们按着磁有序的波矢大小和方向把其中一套费米面移动的话，就可以和另一套费米面全部或部分地重叠在一起，我们称之为“嵌套”。

我们知道，倒空间是对实空间做傅里叶变化得到的，那么这种倒空间的关联一定意味着实空间存在某种周期性的相互作用，从而带来了我们所需要的磁有序。由于倒空间内表示的是大量电子的运动，因此嵌套的存在通常也意味着集体电子行为。

费米面嵌套理论能够帮助我们理解电子之间相互作用不强的体系中为什么会发生无序到有序的相变（这也是为什么材料会表现出金属性）。不过，在实际应用中，它往往有点“马后炮”。最常出现的情况是，实验观察到某一有序态（比如反铁磁）以及费米面的形状之后，我们才可以通过分析两者之间的联系决定费米嵌套理论是否合适。当然，随着理论计算的长足发展，我们现在已经可以在有些体系中直接计算费米面形状并预测其磁有序等信息了（尽管不一定准确）。

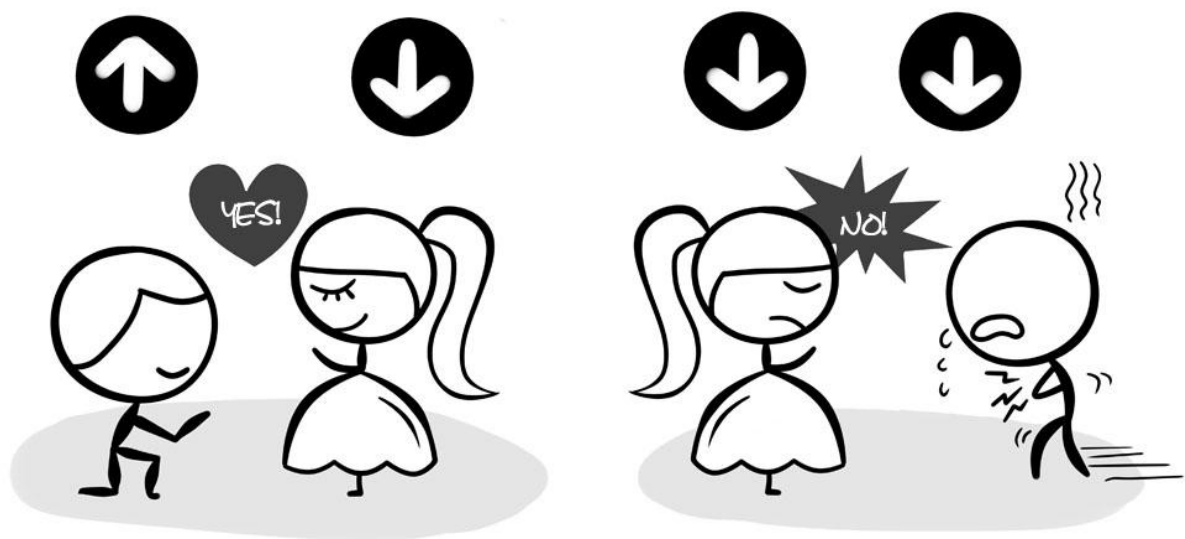
特别致谢：感谢S.L.Li老师参与部分问题的讨论和回答！



18.泡利不相容原理背后的物理意义是什么？为什么会出现“不相容”的现象？

从现象上讲，泡利不相容原理指的是，没有两个电子可以处于完全相同的状态。

在量子力学中，泡利不相容原理是全同性原理应用在费米子系统时导出的必然结果。全同性原理说的是：全同粒子不可分辨。这要求多粒子体系的波函数在交换粒子的操作下是对称或反对称的。其中反对称（交换粒子后波函数差一个负号）对应费米子。为了简单说明这一点，我们考虑两个费米子的系统。记波函数 $\Psi(\alpha, \beta)$ 为粒子一和粒子二分别处于状态 α 和 β 的概率幅。全同性原理要求， $\Psi(\alpha, \beta) = -\Psi(\beta, \alpha)$ ，若要求两粒子处于同一状态，即 $\alpha = \beta$ ，那么必然有 $\Psi(\alpha, \beta) = 0$ ，概率幅为0，也就是不存在两粒子处于同一状态的可能性。这就是泡利不相容原理。



值得一提的是，泡利于1924年提出以泡利不相容原理解释元素周期律，但是在1940年才推导出自旋和统计性质的完整理论。科学发展史是符合人的认知过程的，从表象到本质，从具体到抽象。而往往抽象的东西代表着我们对世界最可靠的理解。在学习和研究自然科学的同时，多了解一点科学史对于科学内容本身的理解也是大有裨益的。



19.量子反常霍尔效应是什么？

要明白量子反常霍尔效应，就得从霍尔效应说起。从1879年到现在，霍尔效应家族越来越庞大。要彻底地理解这个问题需要太多的专业知识，我们这里只是粗浅说明一下。

经典的霍尔效应是指，对磁场 B 中放置的导体，当电流 I 垂直于磁场 B 时，在同时垂直于电流和磁场的方向上，导体两侧会产生电势差，即霍尔电压。这本质上是载流子在磁场中运动、受到洛伦兹力偏转导

致的效应。经典霍尔效应的霍尔电阻（霍尔电压与纵向电流的比值）是随着磁场连续变化的。

说完“经典”就可以说说“量子”了。量子霍尔效应指的是低温强磁场时，霍尔电阻不再随磁场连续变化，而是会在一些特殊值处出现不随磁场变化的恒定值平台，这些平台出现在朗道能级被电子整数（或特殊分数）填充时。有趣的是，平台出现时，纵向电阻（就是电流方向的电阻）为0。这表明在平台出现时，电子输运耗能极小。

可是量子霍尔效应运用到实际中有很强的限制，需要外加强磁场！量子反常霍尔效应解决了什么问题呢？就是在一些特殊材料中，材料本身就具有很强的内部磁场，这个时候就不需要再外加磁场，也能产生量子霍尔效应了，这也就是它的“反常”所在。量子反常霍尔效应不仅仅是物理理论上的突破，同时也是技术上的革命。低能耗的导电材料的应用前景不言而喻。



20.量子力学的第五公设说全同性粒子是不可区分的，它们不能编号，但可以定义交换算符，这是不是自相矛盾？

问到点子上了。首先，第五公设当然是不能随便违背的了。不过在具体操作层面的时候，波函数又不是自己就知道它应该服从第五公设的。所以我们需要将第五公设翻译成数学语言，这样我们就要先给粒子编号，然后再对编号的粒子波函数进行重新组合使它们满足对称/反对称关系。然后这些重新组合的波函数才能满足第五公设的要求。但这里要注意我们在对粒子编号的时候实际上引入了一堆物理上没有

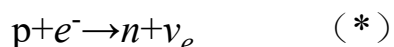
对应物的冗余的自由度。这种自由度就是以后很多高等课程中会提到的“规范自由度”。规范自由度不影响物理结果，所以这里我们权且把它当成一种数学上的处理技巧。

但有时候自发对称性破缺的系统可能会伴随着规范结构的改变，将会等效地导致一些物理结果，这是后话，此处暂不考虑。

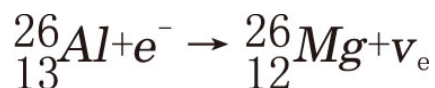


21. 电子遇到正电子会湮灭，为什么遇到同样具有正电荷的质子不湮灭，而只会围绕质子旋转呢？

质子是可以与电子发生核反应的，最常见的反应方式是轨道电子俘获，这也是放射性同位素的衰变方式之一。一些质子含量高的原子核由于其自身的不稳定性，可以通过弱相互作用吸收一个内层轨道电子，使得其内部的一个质子变成中子并放出一个电子中微子，反应式如下：



一个具体的例子是同位素铝26（比稳定同位素铝27少一个中子），它可以通过轨道电子俘获衰变成镁26：



当然，铝26也可以通过 β^+ 衰变生成镁12，它们的总半衰期是70年左右。铝26可被用于陨石年龄的测定，在天文学上非常重要。

至于单独存在的质子与电子发生反应乃至“湮灭”，这是非常困难的事情。根据粒子物理反应中的强子数守恒原则，可以证明质子与电子的反应至少要产生一个重子（由三个夸克或反夸克组成的粒子，如质子、中子、 Δ 粒子、 Λ 粒子等），而质子是最轻的重子，这样如果质子与电子发生反应，生成物总会比它们更重，比如对于（*），中子的静止质量是大于质子与电子静止质量之和的。因此根据质能守恒，必须有极大的额外能量才能使得像（*）这样的反应发生，比如对于轨道电子俘获，这部分能量来自原子核内一个质子转换为一个中子之后其重子排布结构的改变，即原子核结合能的改变。对于单独存在的质子与电子，为了使反应发生，一种方式是在粒子加速器中让它们高速对撞，另一种方式是极大地增加压强，没错，后者正是中子星的形成方式。



22.为什么在 α 衰变中，原子核在放射出 α 粒子（氦核）的过程中，放射出的氦核不会捕获核外电子变成氦原子，而是穿透出了电子云却没有概率引发其他的扰动？

能量相差太多。核反应射出的 α 粒子的动能是MeV量级的，电子和原子核的结合能是eV量级，相差了一百万倍。

这道理就跟你不能空手接子弹一样。



23.量子场论中真空中仍有能量，也就是零点能，为什么？

量子场论预言所有玻色子与费米子都有对应的基态能量，也就是问题所提到的真空所拥有的能量。

不放入任何粒子，那么真空不会含有任何能量，因为它就是纯粹的真空，空无一物，空乏无味。但是我们的世界精彩多了，这里有壮丽非凡的繁星以及种类繁多的生命形式。无论这些物质的形态如何，它们都是由最基本的粒子构成的，因此我们所存在世界的真空并不空。它其实充满着“表现”这些粒子的场，正是这些场的激发创造了基本粒子（构成我们世界基本组分的粒子）。

场的激发可以类比海洋表面的波动。量子场是不平静的，因为你无法知道场确定位置的具体波动状态（这就是不确定性原理）。这种源于量子力学基本原理的量子涨落会产生一个绝对的零点能，也就是场存在于真空所拥有的最小能量（严格地说是最小的能量密度，真空是没有边界的，因此体积是发散的）。因此，真空中的零点能完全是量子效应引起的不可消去的绝对的能量。如今，可观测的宇宙正在加速膨胀，现今理论为此在爱因斯坦场方程中引入宇宙常数项 Λ 。宇宙常数 Λ 所代表的物理意义就是真空的能量。但糟糕的是，人们观测的 Λ 值量级是 10^{-15} 焦耳/立方厘米，量子场论粗略估计的普朗克能标下真空能对应的 Λ 值是 10^{105} 焦耳/立方厘米。它们整整差了120个数量级！所以真空能的本质是什么？它产生的机制又是什么？这都是现今悬而未决的问题。



24.当两个粒子以相对速度为超光速相撞时会发生什么？根据爱因斯坦的相对论，时间会倒流，质量会变成负数，尺寸会变成负数，这成立吗？

爱因斯坦不背这个锅。一个电子相对于你的速度是 $0.75c$ ，一个质子相对于你的速度是 $0.75c$ ，并且方向与电子相反，那么电子相对于质子的速度是多少呢？ $1.5c$ ？错，正确答案是 $0.96c$ 。牛顿体系的简单速度叠加原理（伽利略变换）并不能直接推广到相对论所讨论的情形中。这里要用洛伦兹变换。你想想：参考系一变，长度也变了，时间也变了，咋好意思就直接把速度加起来呢？至于问题中的撞到一起会发生什么， $0.75c$ 的质子对应的能标是几百个兆电子伏。所以这就是一个典型的核物理的过程，多半是释放出伽马射线把能量辐射出来。



25.光子能量是由光子的频率 $E=h\nu$ 决定的，那么假设光源发出一个频率为 ν 的光子，那么光子带走的能量是 E ，那么一个接受光子的装置在此过程中向光源移动，根据多普勒效应，接受光子的装置接收到的光子的频率 ν 就会增加，那么光子转移到这个装置上的能量 E 就会比原来的能量要多，那么这是不是凭空多出来的一截能量？那能量岂不是不守恒了？

这是一个很好的问题，提问者是在自己在思考的。

答案是，频率就是会变。而且我们还用这个频率的变化测量遥远天体与我们的相对速度和相对距离呢（哈勃定律）。

因此，你在不同参考系下测到的能量就是不同的。这没什么，回答这个问题甚至都不需要涉及相对论。

只需明确一下能量守恒定律的确切意义。在现代物理中，能量守恒定律的来源是诺特定律，是由物理定律的时间平移不变性导致的。根据诺特定律，能量守恒定律应该这么表述：“在任意局域的惯性参考系中，能量不能凭空消失，也不能凭空出现，只能从一种能量转换成另一种能量。”

所以你看，在不同参考系下能量不同完全没有关系，只要在各个参考系下能量不会凭空出现和消失就可以了。或者换种说法，能量守恒定律不要求宇宙中存在一个“绝对的总能量”（它可以视参考系而变），只要能量从一种变为另一种的变化过程中是前后守恒的就可以了。

致 谢

本书要感谢中科院物理所“问答”栏目背后的问答团队，这个团队有来自物理所的研究生，包括程嵩（本辑收录问题主要回答者之一）、李治林、张圣杰、薛健、曹乘榕、姜畅、吴定松、葛自勇、袁嘉浩、陈晓冰、陈龙、樊秦凯、纪宇、刘新豹、王恩、杨哲森、杨发枝等。同时也有很多所里科研一线的老师直接回答了部分问题或参与了问题讨论，他们包括曹则贤、翁羽翔、戴希、梁文杰、李世亮、罗会仟、尹彦、陆俊、杨蓉等。

“问答”专栏还吸引了一批热心的所外问答志愿者，他们有中科院理论物理研究所的贾伟、北京理工大学的李文卿、中科院大连化学物理研究所的王事平、中科院国家天文台的何川、资深编辑潘颖等。还有以程卓和袁子等为代表的清华大学物理系物理41班30位小伙伴的倾情支持。感谢你们！

最后，希望物理所微信公众号“问答”专栏这样一个周更的互动平台能吸引越来越多的科学爱好者参与提问，同时期待更多所内外有志成为“物理君”的小伙伴加入我们的团队（直接在“中科院物理所”微信公众号留言即可哦）。

编委会

主 编：文 亚

副主编：魏红祥 成 蒙

委 员：程 嵩 李治林 姜 畅 吴宝俊

李 淼 刘新豹 张圣杰

1. 定义角动量方向沿着地球自转方向——自西向东——为正。将交通规则中车辆靠左行驶改为靠右行驶，会使得交通工具相对于转轴的角动量增加。这是因为所有向东的运动将比之前远离地球的自转轴，因而将获得更多的正向角动量。相反，向西方向的运动则减少了它的负向角动量。假定东西方向（其他方向都有这两个方向之一的分量投影）的交通流量相同，整个地球系统的转动惯量不变。地球系统总角动量守恒，因此地球的角动量将减少，其自转速度减小。（来源：《200道物理学难题》第97题）



未读 Club

为读者提供有温度、有质量、有趣味的
泛阅读服务



专属社群 独家福利
精品共读 活动特权

手机扫码

加入未读 Club 会员计划

未读
DR

U N READ

“中科院物理所”
趣味科普专栏

[第2辑]



又皮又萌、智商爆棚的物理所学霸 **“在线”** 答疑

专门回答 **“老师不教、爸妈不会、不问憋得慌”** 的问题



中国“十大科普自媒体”之一，**100万**物理粉的专属平台

“中科院物理所”官方公众号，超人气科普专栏再次集结出版



汪卫华院士 **作序** 老师好我叫何同学 李永乐老师 毕导 妈咪说MommyTalk **赞赏推荐**

版权信息

1分钟物理：“中科院物理所”趣味科普专栏·第2辑

作者：中科院物理所

出品方：未读·探索家

出版社：天津科学技术出版社

目录

[编委会](#)

[推荐序](#)

[力学篇](#)

[01. 抽水机是怎么把水抽上来的？](#)

[02. 千斤顶是什么原理，为什么只需轻轻用力就可以顶起很重的物体？](#)

[03. 为什么高速转动的机械经常会产生振动？](#)

[04. 饮料瓶拧上瓶盖后是如何防止漏水的，只是单纯地紧密贴合吗？相比之下带胶圈的水杯呢？瓶盖处的受力怎么分析？](#)

[05. 吸管可以穿透土豆吗？](#)

[06. 回旋镖是如何飞行和折回的？](#)

[07. 汽车发动机的工作原理是什么？](#)

[08. 为什么跑步的时候要摆臂？](#)

[09. 为什么人手拿着重物不动也会消耗能量，这并没有做功啊？](#)

[10. 走路时摩擦力是如何做功的？](#)

[11. 摩擦力与接触面积无关，但为什么踮起脚尖身体旋转起来更轻松？](#)

[12. 洗衣机的工作原理是什么呢？](#)

[13. 气球为什么飞不到外太空？](#)

[14. 泡泡是如何形成的，又是怎么破碎的？](#)

[15. 水的凹液面是怎么形成的？](#)

[16. 为什么水龙头流下来的水，水柱会越来越细？](#)

[17. 水滴在荷叶上为什么会滚来滚去？](#)

[18. 影视作品中经常会看到人从高处跳落到地面后有一个翻滚动作，这个动作是怎么卸去或减小冲击力的？](#)

[19. 为什么在倒果汁、牛奶时，液体总是不能连贯地流出，而是一股一股的呢？](#)

[20. 为何没有意识的人，抱起来比有意识的更重？我觉得是重心引起的力矩变化造成的，能给出详细解释吗？](#)

[21. 请问每次大型货车、客车刹停后总能听到放气的声音，这是什么声音？](#)

[22. 水银体温计的缩口到底是什么原理？](#)

[23. 踢足球时如何做到用脚背将球稳稳停住而球不弹出去？](#)

[24. 惯性不是力，为什么常有人说惯性力？](#)

25. 为什么指甲或者铁丝在被剪断之后会弹出很远，而不是原地掉下来？

26. 为什么用一根手指可以让坐着的人站不起来？

27. 为什么湿衣服在身上很难脱下，而光脚踩在湿的地面上就容易滑倒？

28. 水龟为什么不会沉下去？

29. 为什么玩滑板时，猛然向上跃起，滑板也会跟着向上运动，就像粘在脚底？

30. 用相同的力转动一个生鸡蛋和一个熟鸡蛋，为什么熟鸡蛋转动的的时间更长？

31. 溜溜球甩出去，为什么能自己滚上来？

32. 为什么放风筝放到一定高度要收线再继续放长呢？

33. 怎样最快地把装满水的瓶子里的水全部倒出来？是直接把瓶子倒过来快，还是倾斜一定角度（水不把瓶口封住）快？

34. 如何摆脱地心引力？

35. 如果压力足够大，水可以被压缩吗？

36. 为什么钢化玻璃敲边缘比敲中间容易碎？

37. 两辆车拔河（车头相反），到底是车重还是马力决定谁拉动谁？

声学篇

01. 能解释一下音爆现象吗？

02. 为什么在打电话时对方能听到你的声音？为什么手机等音频设备能录入人的声音？

03. 为什么听手机录入的自己的声音和自己真实的声音差别很大？

04. 响指是如何打响的？

05. 麦克风为什么能让声音变大？它是怎么转化我们的声音内容的？

06. 请问，顺风时，声音的传播速度会不会变快？

07. 共鸣腔为什么能提高声音的响亮程度？

08. 一段绳子在两端同时摇，绳子会在中间相互抵消归于平静。我想知道声波可以吗？如果可以，能不能用于整治噪声污染？

09. 通过耳朵来判断声源一定准确吗？

光学篇

01. 请问激光如何分类？为什么有的激光能够透视，有的能够切割？它们本质上有什么不同？

02. 为什么买的红色激光笔看着光点好像有许多小红点在动？

03. 验钞机发出的是紫光，但此光并不是紫外线，那么验钞机发出的究竟是什么光？

04. 为什么用微波炉加热食物时不能用金属餐具？

- 05. 如何从物理学角度解释玻璃是透明的？
- 06. 为什么被水打湿的纸张比干纸张的透光性好？
- 07. 近视的人不戴眼镜，用镜子反射看物体，为什么也看不清？
- 08. 我是近视眼，摘了眼镜之后看不清东西，但是透过拳头的小孔还是能看清一些，这是我眼睛眯起来的原因还是小孔成像的原因？
- 09. 人老了会又近视又老花眼吗？
- 10. 为什么在水里睁眼看东西会看不清？
- 11. 为什么眯着眼看灯光会有光柱的感觉？
- 12. 用非2B铅笔或中性笔涂机读卡可以被识别吗？
- 13. 为什么肥皂泡有彩色条纹？
- 14. 夏天阳光很猛烈的时候，在高速公路上开车，为什么会看到前方一两百米远的地面在反光，好像有积水一样？
- 15. 请问人造光大致分为哪几种，分别有什么特点，与太阳光相比有什么不同，能不能使植物进行光合作用？
- 16. 平面镜成像，为什么是与实物左右颠倒而不是上下颠倒？
- 17. 为什么烤火炉时不用涂防晒霜呢？
- 18. 运动手环测心跳用的是什么工作原理？
- 19. 为什么两个影子靠近时会相互吸引？怎么确定是谁吸引谁呢？
- 20. 地铁里检测液体的仪器运用了什么原理？
- 21. 为什么有些厚玻璃从侧面看是墨绿色的呢？

电学篇

- 01. 手指能滑动手机屏幕，有些东西却不能。什么样的材质才能滑动手机屏幕呢？为什么手机屏幕上有水滴时会发生触屏失灵的现象？
- 02. 手机是如何测剩余电量的？
- 03. 手机是怎样计算行走步数的？
- 04. 为什么冬天的时候裤子上会带电，电荷是从哪里来的？
- 05. 打火机上的电打火器运用了什么原理？
- 06. 为什么带电物能吸引轻小物体？
- 07. 高考的考场内是如何做到信号屏蔽的呢？
- 08. 冬天时手机为什么更费电？
- 09. 打开小风扇，把扇叶捏住让它不要转，那么它还会继续耗电吗？
- 10. 油罐车后面那条铁链有什么用？
- 11. 为什么远程输电要用交流电呢？
- 12. 交流电、直流电可以互相转化吗？如果可以，怎样转化？
- 13. 食盐水导电到底是物理变化还是化学变化呢？
- 14. 金属探测仪的原理是什么？

热学篇

01. 为什么保温杯装热水后会变得很难打开？热胀冷缩，不应该更容易打开吗？
 02. 为什么保温杯装进烧开水，盖上盖子后摇晃一下，会有大量热气喷出来甚至顶开盖子？
 03. 为什么暖气上方的白墙会被熏黑？
 04. 车窗玻璃边缘为什么会有黑色的小圆点，有什么作用？
 05. 空调是怎么吹出冷气的？
 06. 为什么空调要分制冷和制热呢？如果冬天开制冷二十几度不也会暖和吗？
 07. 夏天车被暴晒后，如何快速降温？
 08. 喝粥时从边缘喝起，不会太烫，但是中心温度很高，这是什么原因呢？和水表面张力有什么联系吗？
 09. 夏天的时候可以打开冰箱来给房间降温吗？
 10. 自热火锅是怎么产生热量的？
 11. 为什么泳池里的水总是有的地方二十五六度，有的地方十七八度？说好的热平衡呢？说好的无序运动呢？
 12. 水的沸点就是水的最高温度吗？
 13. 摩擦是如何产生热量的？
 14. 我们说温度是分子运动产生的，如果把一个瓶子里的空气抽干，那么里面的温度是怎么样的？
 15. 干冰扔到水里以后出现的大量白雾是怎么形成的？
 16. 为什么细菌不能通过低温杀死，却能通过高温杀死？
 17. 为什么气温回升，地上的雪都化了，堆起来的雪人却没化？
 18. 为什么在夏天水泥地比草地热？
 19. 过冷水为什么不会凝结？
 20. 高压锅煮饭为什么快？
 21. 沸石是如何防止暴沸的？
 22. 为什么夏天楼道里比外面凉快许多？
- 杂学篇
01. 为什么洗洁精要把水和油融合在一起才能洗掉油渍？
 02. 橡皮擦铅笔字是怎样一个过程？
 03. 一直很想知道，为什么只闭上左眼时感觉看到的景象向左移动了，而只闭上右眼时就感觉景象向右移动了呢？
 04. 蒸熟的包子表面那层美味的皮是如何产生的？
 05. 为什么心脏可以不休息地一直跳动？
 06. 为什么食用油不能燃烧？
 07. 为什么用钢笔在被水浸湿的纸上写字，写出的字会洇开？

08. 为什么气球碰到柠檬酸会爆？
09. 酒精是如何杀死细菌的？
10. 烧开的水为什么会有很多白粉末？
11. 为什么在车上玩手机会头晕？
12. 为什么干燥剂遇水会爆炸？
13. 透明胶带在被撕开时可能有两种情况：撕得慢透明胶带就发白不透明；撕得快就是透明的。产生这两种情况的原因是什么？
14. 为啥吃了薄荷糖之后张嘴呼吸嘴里会很凉呢？
15. 一直困扰了多年的问题：掷硬币到底是不是随机的？如果我设计一台掷硬币的机器，每次它掷硬币的力度、接触面积、外界环境完全一致，那么每次硬币落下后的面是不是一样的呢？
16. 为什么牛奶可以去除异味？是和活性炭的原理一样吗？还是里面的有机物和其他物质反应了？
17. 为什么航海船上的信号火炬可以在水下燃烧一段时间？就算有固体燃料或者镁、磷一类物质，但没有助燃剂啊？
18. 流动的水比静止的水更难结冰吗？
19. 口香糖为什么不会粘住口腔？
20. 木柴燃烧时释放出的烟是什么？无烟煤为什么冒烟少？
21. 为什么纸燃烧的时候不冒烟，火灭了才冒烟？
22. 为什么长时间不洗头，第一次打上洗发水搓不出很多泡沫？
23. 涂改液是怎样制作的？里面那个摇起来会响的东西是什么？
24. 等离子体是不是只有在高温中才能出现（例如火焰的高温部分或闪电）？如果是这样，那等离子消毒也是一个高温的过程吗？
25. 跳跳糖里有什么物质？
26. 为什么方便面是弯的而不是直的？
27. 为什么大部分跑道都是逆时针的？
28. 水喝多了还会水中毒，所以水有毒性？
29. 可乐遇到牛奶出现沉淀是什么原理？和牛奶里加食用盐，盐析蛋白质是一个原理吗？
30. 为什么湿手碰洗衣粉会感觉到轻微的灼烧感？
31. 现在有没有一种技术能使石墨在特殊情况下反应变成金刚石呢？
32. 臭氧为什么能污染环境呢？
33. 为什么高铁过隧道时人的耳压会升高？
34. 为什么在灶膛里烧柴火，烟不会朝人的方向飘而是自动往灶膛里面飘然后从烟囱排出？

自然现象篇

01. 为什么河流总是弯的？

02. 为什么浪花看起来是白色的，而不是和海水一样的颜色？
03. 同样是由水分子构成的，为什么雪是白色的，而冰是透明的？
04. 为什么冰块只有一小部分在海面上，大部分在海面下？
05. 出现鬼火是什么原因？
06. 雾和霾怎么区分？
07. 为啥同样是乌云密布，有时候打雷有时却不打呢？
08. 云朵重吗？如何测量一朵云的重量？
09. 白云和乌云有什么异同？
10. 为什么雨落下的时候是一滴一滴的，而不是像倒水一样一股水流呢？
11. 为什么空中下落的雨滴无法砸死人？
12. 有道是“山雨欲来风满楼”，为什么下雨之前会刮风呢？
13. 为什么有的时候白天也能够看见月亮？什么条件下更容易在白天看到月亮？

脑洞篇

01. 如果一个人手拿冲锋枪从五楼跳下，从起跳开始手拿着冲锋枪对地面射击，忽略换弹夹时间，这个人能否安全着地？
02. 在天空中多高的位置装一面多大的镜子，可以让我们在地上看到如月亮般大小的地球的影像？
03. 为什么人不会飞？
04. 我们能用水浇灭太阳吗？
05. 为什么人跳在地上后不会弹起来，而篮球、足球等物体可以？
06. 假设我有一支功率足够强大的激光笔，照射向500万光年以外的深空，然后我旋转这支激光笔，不考虑途中其他天体引力影响，在足够大的尺度上，光柱（不是指单个光子的传播路径）看起来是弯曲的吗？
07. 如果将一个人放在一个地板完全光滑的空旷房间中央，这个人有可能逃脱吗？
08. 嗯.....一个64G的手机，装满文件后会变重吗？
09. 如果臭氧层破了，我们会怎么样？
10. 身体里有钢钉，雷雨天气会有危险吗？
11. 怎样！才能！减肥！
12. 皮卡丘发的是交流电还是直流电？
13. 要多大的声音才能让整个地球都听到？
14. 电影中刀劈子弹的场景现实中能做到吗？如果能做到，肉体 and 反应需要锻炼到什么程度呢？
15. 从物理学的角度来看，中国龙是怎么飞起来的？

16. 癌细胞是无限增生的，那么可以通过体外培养癌细胞来为人类提供无限食物吗？

17. 有没有可能存在非常薄却比厚衣服还保暖的衣服？

18. 如果在地球上搭一个足够长的梯子到月球，人能否慢慢地爬上月球，而不需要第一宇宙速度？（假设人可以一直爬）

19. 金箍棒重一万三千五百斤，孙悟空挥舞起来就跟我们挥舞普通棍子一样，这是不是力气足够大就可以？

20. 万有引力无处不在，我们是否可以利用它来获取能源，从而使我们生存、发展呢？

21. 地球一共有多少个原子？

22. 为什么只有圆形的泡泡？

23. 为什么红色光和绿色光混在一起可以看到黄色光，而钢琴上的do和mi一起按下去却听不出re来？

24. 怒发冲冠可能吗，毕竟头发——特别是长发——那么软？

25. 火焰导电吗？

26. 影子可不可以是彩色的？

27. 人类若同步同向走路，能否扰乱地球的自转？

28. 为什么粉笔大多数时候掉到地上总是会摔成两半呢？

宇宙篇

01. 为什么宇宙膨胀速度会大于光速？光速不是不可超越的吗？

02. 根据相对论，我们的宇宙是没有一个统一的时间的，时间是相对的。那么我们常说的宇宙年龄138亿年是怎么回事？是相对于我们说的吗？我们怎么知道一定有一条类时曲线连接我们和大爆炸？

03. 普朗克常量是怎么得出的？

04. 什么是反物质？它为什么会很贵？它是怎么形成的？

05. 接收到一束光，我们是如何计算出它是从多少年以前从某个恒星上发出的呢？（最好能用公式解答）

06. 向两个相反的方向发射激光，光线走过相同的距离所花的时间是不是不一样？我这样想是想测量地球随宇宙膨胀的速度。

07. 引力波是电磁波还是机械波？

08. 光子不是有质量吗，那是不是我用一个凸透镜把一束光汇聚在极小的一点上可以制造出一个黑洞？

09. 为什么重核聚变到铁就结束了？

10. 太阳的热量会在亿亿亿.....年后散发殆尽吗？

11. 黑洞因其强大的引力致使光都无法逃逸，那为什么黑洞还能发出X射线？难道说X射线的运动速度超过光速？

12. 黑洞的背后是什么？它吸了那么多东西，都到哪里去了？

- 13. 太阳系为啥是扁平的，有可能是立体的吗？
- 14. 如何不用微积分的原理给小朋友解释地面为什么是平的而地球是圆的？
- 15. 为什么月亮跟着我走？
- 16. 月球能够用万有引力吸引它地面上的尘土，那么为什么它不能吸引空气分子，反而是真空呢？
- 17. 为什么有时候月亮看起来是银白色的，有时候是橘黄色的呢？
- 18. 月球总是正面朝向地球，那么其正面的坑是怎么形成的呢？

学习篇

- 01. 什么是非牛顿流体？有什么用？
- 02. 什么是虹吸现象？它的原理是什么？
- 03. 如何简要证明阿基米德浮力定律？（最好不要用到高等数学）
- 04. 游标卡尺的工作原理是什么？
- 05. 地球轨道上，卫星中的设备是处于失重状态的，那么电机带动的转盘是不是不需要考虑其转动惯量了呢？是不是说转盘的转动惯量近似为零呢？
- 06. 真空的意思到底是什么？真的是什么也没有吗？
- 07. 什么是最速曲线？原理是什么？
- 08. 为什么物体加速度的大小跟物体质量成反比？
- 09. 不受外力的转动的物体的转动惯量改变时为什么遵循角动量守恒而不遵循机械能守恒？
- 10. 同是曲线运动，为什么平抛、斜抛运动加速度不变，而匀速圆周运动就与众不同？
- 11. 为什么在碰撞中完全非弹性碰撞动能损失最大？
- 12. 绝对零度时，分子会停止运动吗？
- 13. 为什么降低气压液体沸点会降低？
- 14. 离心力可以消减重力加速度吗？
- 15. 为什么玻璃棒这类物体能够引流？
- 16. 胡克定律只适用于弹簧吗？
- 17. 为什么水的比热容最大？
- 18. 为什么分馏可以用来分离混合液体，难道液体只有在沸腾状态下才会变成气体吗？
- 19. 焰色反应的根本原理是什么？
- 20. 盐水可以降低溶液熔点的原因是什么？有没有升高熔点或升高/降低沸点的方法？
- 21. 如何理解“晶体是空间平移对称破缺的产物”这句话？（原子位置的周期性破坏了任意平移的不变性）

- [22. 为什么气体溶解度会随着温度升高而降低，随着压强增大而增大？](#)
- [23. pH指示剂的原理是什么？](#)
- [24. 我同桌告诉我铊（Tl）一般不是正三价，但铊不是和铝（Al）属于同一族吗？](#)
- [25. 永磁材料的磁性是怎么产生的？](#)
- [26. 一块磁铁，靠近铁芯，铁芯被磁化后其周围磁场会增强，也就是说磁场能量增大了，此处增加的能量从哪里而来？](#)
- [27. 为什么切割磁感线会产生电？](#)
- [28. 安培力是洛伦兹力的宏观表现，但洛伦兹力永不做功，为什么安培力还能做功？](#)
- [29. 为什么带电导体处于静电平衡时，静电荷分布在导体表面，而且曲率半径大的地方电荷密度小？](#)
- [30. 想知道一节电池是怎么确定电动势的，或者说为什么设计好之后电池就刚好有这么大的电动势，这与哪些控制因素有关？](#)
- [31. 如果在无氧环境中利用电流热效应加热碳，碳是否会熔化？](#)
- [32. 请问两物体因接触而产生的热传导，如何用微观粒子来解释和描述？](#)
- [33. 物体表面积变大，热辐射就变大吗？](#)
- [34. 热电效应是什么？有什么应用？](#)
- [35. 光是否具有动量？](#)
- [36. 光学显微镜分辨率受到可见光波长的限制，那电子显微镜会受到物质波波长的限制吗？](#)
- [37. 为什么有些金属离子在水中有颜色而有些没有？颜色又是怎么产生的呢？](#)
- [38. 原子中电子从基态到激发态的过程是瞬间移动还是像我们跳楼梯一样有一个跳动的过程？](#)
- [39. 镜面反射时光走的路程是最短的，光怎么知道它走这条路的路程是最短的？](#)
- [40. 用逐渐减小狭缝宽度的方法能否使穿过狭缝的一束光不断地变窄？](#)
- [41. 在做电子衍射实验时，为什么要对电子进行高压加速？如果电子能静止，波长会无限大吗？](#)
- [42. 请问双缝实验是为了探究什么？](#)
- [43. 微观的自旋是怎么提出的？该如何理解？](#)
- [44. 量子力学在实际生活中有哪些应用？](#)

[致谢](#)

[返回总目录](#)

编委会

主 编：文亚

副主编：魏红祥 成蒙

委 员：程嵩 李治林 刘新豹 姜畅 樊秦凯 陈龙 张圣
杰 葛自勇 方少波 田春璐 吴宝俊

推荐序

还记得你是什么时候接触到“物理”这个词的吗？又是什么契机引发了你对科学的兴趣？你是否经常在家里、在课堂上、在旅途中、在阅读时……突然发出对某个现象的疑问呢？在产生这些疑问时，你都找人提问或自己找到答案了吗？

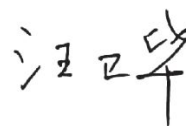
2019年3月，《1分钟物理：“中科院物理所”趣味科普专栏[第1辑]》面世，书里面238则有知识、有趣味、有启发的科普问答，就是从成千上万个网友的提问中生发出来的。书出版后，很快受到了广大读者朋友的喜爱和推崇。在科学普及成为实现国家创新发展重要之翼的今天，科普工作者在感叹社会公众对汲取科学知识有着浓厚兴趣的同时，也意识到科学传播工作任重道远。怎样以最通俗的方法讲述最严谨的科学，点燃民众对自然科学的学习热情，是我们一直在探寻的科普之道。

同样在2019年，中科院物理所微信公众号创办后的第五个年头，粉丝数突破了百万，承载着创作的喜悦和大家的期待，人气“问答”专栏迎来了第200期。在继续为大家凝练精华的同时，时隔一年，《1分钟物理[第2辑]》也“如约而至”。相信读过第1辑的读者对丛书的内容特点和设计风格已经有所了解，为了更好地兼顾科学性和趣味性，第2辑将所有问题归纳为十大类：力学篇、声学篇、光学篇、电学篇、热学篇、杂学篇、自然现象篇、脑洞篇、宇宙篇和学习篇。新的一辑希望能以更细致、更准确的分类，让读者更快锁定想要了解的物理学知识。

在这一年“问答”专栏收到的问题中，我们欣喜地发现，越来越多的粉丝从生活的点滴中捕捉物理学的奥秘：“为什么湿衣服不好脱下来？”“手机是如何测剩余电量的？”当然也有在脑洞世界里的各种思考：“人类若同步同向走路，能否扰乱地球的自转？”“能用水浇灭太阳吗？”每每看到这些妙趣横生的问题，我就忍不住拍手叫好，这些看似“不着边际”的问题，背后往往蕴含着深刻的科学知识，值得我们去

思考去解答。在这些问题当中，很可能就有你一直“憋在心里口难开”的疑问。

人类对未知无穷尽的探索附加了科学神秘的标签，生活中无处不在的奇妙现象又揭示出真理就在身边。中科院物理所播撒的科学种子之所以能够发芽生长，是因为既立足于融媒体时代多平台、多形式的传播手段，也有赖于背后有这样一群科学知识的“播种者”——热衷于科学传播工作的科学家和研究生们，是他们将严肃的自然科学讲述得如此生动可爱。在这里，我要对包括本书的参与者在内的所有科普工作者们为科学传播工作的倾情付出表示感谢，同时诚挚地向读者推荐《1分钟物理》系列科普读物，希望大家通过阅读本书，在探究自然奥秘的过程中增进对物理科学新的认识，感受宇宙万物的无穷魅力。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '汪志庆' (Wang Zhiqiang).

2020年3月于北京

（序言作者系中国科学院院士、材料物理学家）

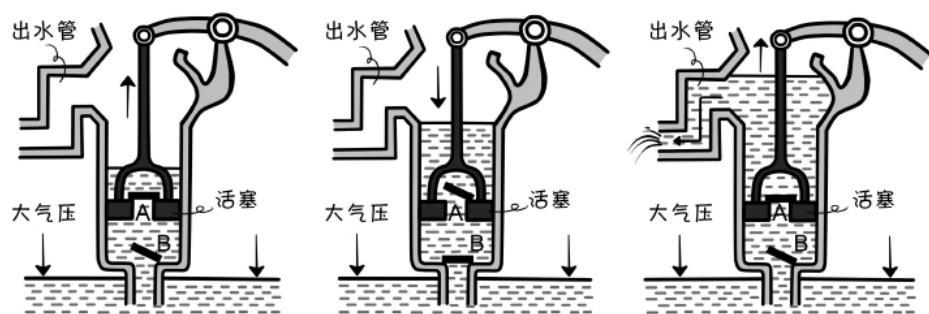
力学篇

01 抽水机是怎么把水抽上来的？

抽水机这个东西，种类较多，所用的原理也不尽相同。不过市面上较流行的两类抽水机，活塞式抽水机和离心泵，均是利用大气压强抽水的。

利用大气压强抽水，在日常生活中比比皆是。我们用吸管吸食饮料时，就是将吸管中的大部分空气吸走，使吸管内压强降低，饮料在外面压强的作用下顺着吸管流到我们嘴里。

活塞式抽水机和离心泵，虽然它们在技术细节方面大相径庭，但其抽水的物理原理都是利用了大气压强。活塞式抽水机结构简单，其吸水管道中有一个活塞，活塞与管道中均有阀门（如下图）。活塞向下运动时，活塞上阀门打开，管道中阀门关闭，水流到活塞之上；活塞向上运动时，活塞上阀门关闭，活塞向上运动将水提起，同时管道内压强降低，水池中的水（或地下水）在大气压强的作用下顶开管道中的活塞，进入管道。早期的抽水机大多为活塞式。



离心泵是用螺旋扇叶代替活塞，依靠扇叶将水“甩出”，造成管道内压强降低，使水沿管道运动的。现在市面上见到的大多是这种离心泵。

这两种抽水机在工作前都需将抽水管道中灌满水，以便形成更优良的密封环境。

02 千斤顶是什么原理，为什么只需轻轻用力就可以顶起很重的物体？

千斤顶分为机械千斤顶和液压千斤顶等，它们的原理有所不同。从原理上来说，液压传动的最基本原理就是帕斯卡定律，也就是说，液体各处的压强增量是一致的。液压千斤顶可以看作一个连通器，两边各有一个大小不同的活塞。在平衡的系统中，比较小的活塞上面液体施加的压力比较小，而大的活塞上面液体施加的压力比较大，这样能够保持液体的静止。所以通过液体的传递，加在大小活塞上的压力大小不同，从而达到压力变换的目的。人们常见到的液压千斤顶就是利用了这个原理来达到力的传递的。

螺旋千斤顶又称机械千斤顶，使用时由人力往复扳动手柄，棘爪即推动棘轮间隙回转，小伞齿轮带动大伞齿轮，使举重螺杆旋转，从而使升降套筒起升或下降，最终实现起重的功能，但不如液压千斤顶简易。



03 为什么高速转动的机械经常会产生振动？

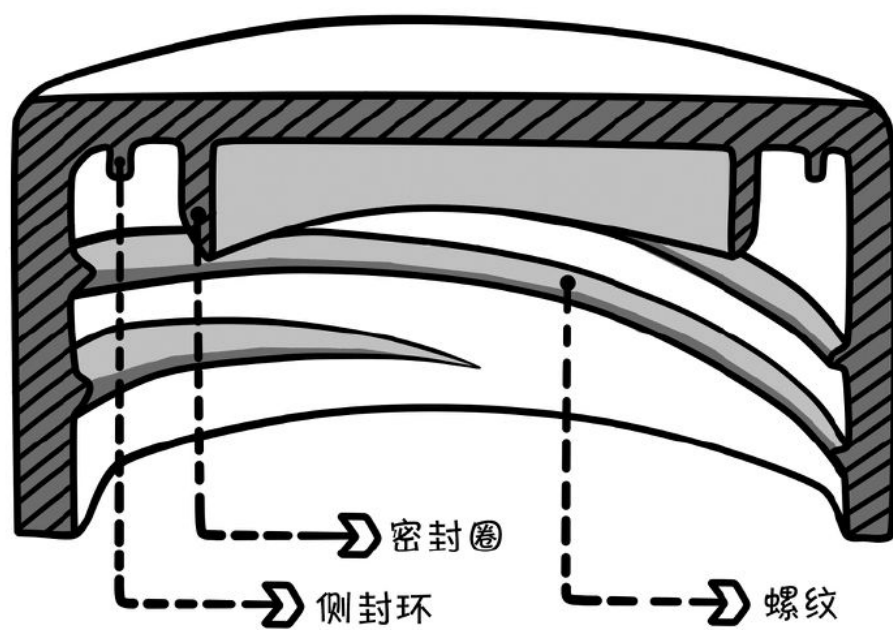
我们拿最简单的车轮来举例说明。在车轮高速转动的过程中，车轮上的各个质点都在运动，轮子的质心是受这些质点的运动影响的，如果可以通过精准的制造工艺确保车轮的质心刚好落在转轴上，那么，不论车轮转动多快，它的质心始终是不动的（毕竟转轴不动嘛）。这样就能保证车轮稳定地转动。

但是如果质心没有刚好落在转轴上，质心就会绕转轴高速运动，质心的这种圆周运动就是振动的来源。高速转动的机械由于制造工艺不精、零件松动、高速转动中形变等原因往往不能使转动部分的质心始终处于转轴上，这样就会产生振动。在实际操作中，我们总是想尽办法消除这种振动，然而，有时候我们也会利用这种振动：手机振动就是这样一个例子，它就是使用偏心轮（质心不在转轴上的轮）来实现“嗡嗡”振动的。

04 饮料瓶拧上瓶盖后是如何防止漏水的，只是单纯地紧密贴合吗？相比之下带胶圈的水杯呢？瓶盖处的受力怎么分析？

瓶盖的结构主要由螺纹、密封圈、侧封环组成（有些瓶盖在密封圈和侧封环之间还会加一个顶封环）。在瓶盖拧紧后，瓶口会牢牢顶住瓶盖，并卡在密封圈与侧封环之间，密封圈伸进了瓶口，增加了密封面积。如果我们纵向剖开一个瓶盖就可以看到，密封圈延伸出去部分的半径要大于底部半径，并且末端还带有一定弧度，这使得密封圈更好地与瓶口内沿接触，达到密封的效果。侧封环与瓶口外沿紧密接触，阻挡了瓶外物质向瓶内的渗入。橡胶圈具有一定的弹性，在和瓶口接触后可以实现软密封，因此一般带有橡胶圈的容器密封效果会更好。瓶盖的内螺纹和瓶口的外螺纹接触挤压，其主要作用在于产生摩擦力矩，使瓶口牢牢顶住瓶盖而不会轻易松动。

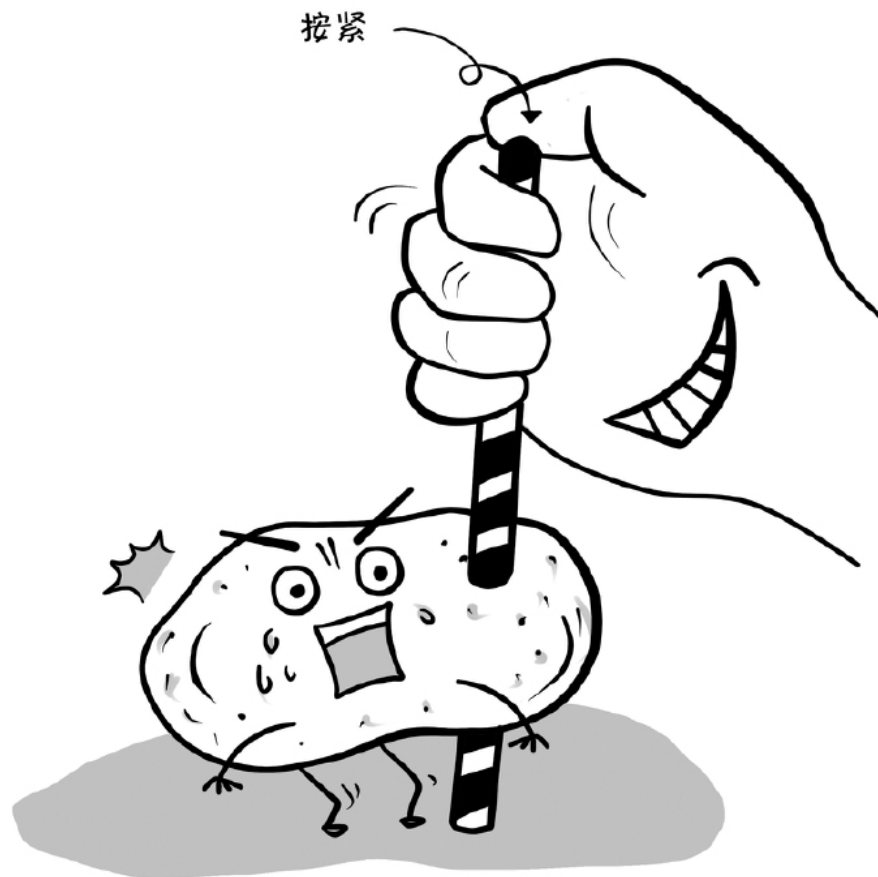
瓶盖剖透视



◆◆◆

05 吸管可以穿透土豆吗？

在生活中你一定遇到过因为吸管被扎弯而喝不到饮料的状况。有人还因此提出了使用吸管的诀窍：一定要趁着饮料不注意突然扎下去，这样才能让包装纸来不及反应。这种方法显然有很多玩笑的成分在里面。归根到底，吸管容易弯折是由它薄弱的管壁和中空的结构造成的。如果我告诉你我可以用一根普通的吸管穿透一个生土豆，你会不会觉得不可思议？当然这个操作是有诀窍的，我需要用我的拇指堵住吸管的一端，然后将另一端用力地扎向土豆。这时吸管好像突然变得结实了很多，土豆被吸管直接穿透。吸管变得结实的原因是，当吸管插入土豆一部分之后，手指和进入吸管内部的土豆将吸管的两头封堵，吸管内部的空气被限制在内部不能排出，随着进入吸管的土豆越来越多，空气逐渐被压缩。压缩空气相比外部的空气具有更大的压强，它还可以对吸管壁起支撑作用，所以吸管就变得不易弯折，穿透土豆也就变成顺理成章的事了。



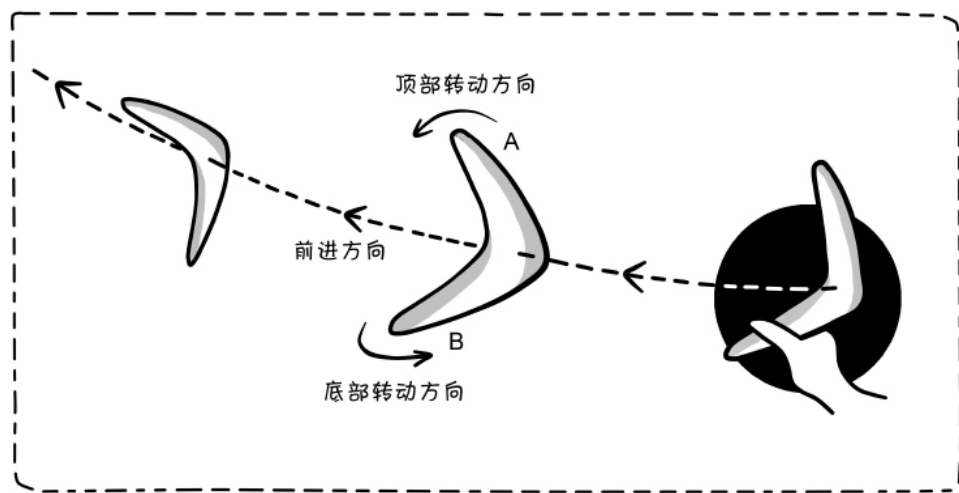
你可能会问，为什么压缩空气的压强更大呢？我们可以做一个小实验来感受一下：你只需要一个小小的针筒就可以完成这个实验（一定要把针头去掉）。用你的手指堵住针筒的一端，然后去按压针筒的芯杆，是不是感觉有东西在抵抗你往下按，而且越往下按越费力？这就是针筒中的压缩空气在起作用。在这个小实验中，我们还可以知道空气被压缩得越厉害，它的压强就越大。

06 回旋镖是如何飞行和折回的？

说起回旋镖，从形状上来说，有没有觉得它和飞机的机翼有异曲同工之处，假如把飞机的机身去掉，只留下两个机翼，拼起来是不是就像一个回旋镖？

假如把回旋镖看作一个简单的倾斜面，那么根据牛顿第三定律，当你把它甩出去时，它会使空气向下偏转，从而使飞镖向上偏转。而飞机与回旋镖类似，只是其推力来源于其发动机。

我们知道空气速度的增加会导致静态压力的减小（流体系统中的伯努利定律），如下图所示，回旋镖受力向图的左侧飞行，此时它的转动方向为逆时针，当空气穿过回旋镖时，空气会在另一侧相遇，所以它的速度会加快。由于顶部（A）相对空气的移动速度比底部（B）的空气移动速度快，从而产生了一个力矩，这个力矩会改变回旋镖旋转的角动量的方向（也就是回旋方向的轴向），这一机制称为陀螺式的进动过程，直接导致了飞镖折回的现象。



07 汽车发动机的工作原理是什么？

汽车发动机是一种能量转换设备，它将燃料燃烧产生的热能转变成机械能。要完成这个能量转换必须经过进气：首先把可燃混合气（或新鲜空气）引入汽缸；其次将进入汽缸的可燃混合气（或新鲜空气）压缩，压缩接近终点时点燃可燃混合气（或将燃油高压喷入汽缸内形成可燃混合气并引燃）；可燃混合气着火燃烧，膨胀推动活塞下行实现对外做功；最后排出燃烧后的废气。简单来说，就是进气、压缩、做功、排气四个过程。我们把这四个过程叫作发动机的一个工作循环，工作循环不断地重复，就实现了能量转换，使发动机能够连续运转。



08 为什么跑步的时候要摆臂？

先放答案：主要是为了平衡。这个问题实际上科学家还没有完全搞清楚，虽有论文发表但是没有定论。比较公认的说法是为了平衡腿在前进过程中产生的角动量。什么是角动量呢？你可以理解为一个让描述物体保持旋转的惯性的量（就像动量是描述让物体保持运动的一个量），如陀螺在旋转的时候如果没有外力矩的作用，角动量是不变的。跑步摆臂与走路摆臂的原理类似，这里以走路为例。

人体在前进的时候，地面对人的摩擦力给人体一个力矩，产生一个角动量。与陀螺类似，如果没有外力矩的作用，人体就会以这个方式旋转下去，这会使人摔倒。为了不摔倒，人体的上肢会做一个相反的运动来产生相反的角动量以抵消腿部产生的角动量。

另一个对这个问题的解释是从能量角度出发的。密歇根大学的科学家发表了一篇文章比较了四种走路方式人体所消耗的能量：正常走路、把双臂绑起来走路、保持双臂背后走路和顺拐走路。他们发现正常走路消耗的能量最低，比双臂绑起来走路和保持双臂背后走路少12%，比顺拐走路少26%！虽然把双臂绑起来走路减少了摆臂所需要的能量，但比正常走路要多消耗能量。这是因为摆臂减少了腿部推动身体前进所要消耗的能量，当你移动腿的时候，身体也会跟着移动，但是上肢的移动减少了身体移动所需要花费的能量，所以要比完全不摆臂消耗更少的能量。但是这并不意味着你可以通过顺拐减肥，科学家发现不按照正常模式走路可能会对脊柱有害，所以还是乖乖运动吧。



09 为什么人手拿着重物不动也会消耗能量，这并没有做功啊？

虽然物体没有运动，但人并不是没有产生能量消耗，只是人没有对物体做功而已。

人为了维持拿着重物这一状态，需要肌肉保持一定的收缩、张弛，虽然肉眼不能直接看到肢体的弯曲，但其实肌肉还是变化了的。而这就需要消耗能量。



10 走路时摩擦力是如何做功的？

摩擦力分为两种，一种是滑动摩擦力；另一种是静摩擦力。如果在接触面上没有产生相对滑动，那么便没有滑动摩擦力的产生，而只有静摩擦力。力在力的方向上产生了位移便会做功，即功=力×位移，如果没有发生位移，那么这个力便没有做功。人在走路的时候，脚并没有和地面之间发生相对滑动，因此没有产生滑动摩擦力，只有静摩擦力，但静摩擦力并不做功。

那么人前进的时候是什么力在做功呢？答案是你的肌肉。人在前进时，后脚是斜向后蹬的，由于脚受到摩擦力与地面的支持力，所以会产生反作用力传递到躯体，这个斜向前的力做正功才使得躯体向前运动。静摩擦力虽然不做功，但是它为肌肉做功提供了条件，即它是机械能传递的媒介。肌肉收缩带动肢体运动的能量来源于体内ATP（三磷酸腺苷）释放产生的化学能。



11 摩擦力与接触面积无关，但为什么踮起脚尖身体旋转起来更轻松？

我们一般是这样旋转的：扭动身体，准备发力，在发力的一瞬间抬起一只脚，身体便转动了起来。因此，当我们一只脚离地开始转动的时候，实际上肢体便不会再做功了。这便是给定了初动能，在摩擦力做负功的情况下的转动问题。理想的情况是我们的动能全部转化为摩擦力的热能，停止转动。虽然动摩擦力的大小与接触面积无关，即

$$f = \mu mg$$

但我们脚与地面的接触面积变化会影响摩擦力的做功。脚在地面上摩擦转动，越靠近转动中心，圆周运动的半径越小，此时摩擦力做功的路径便越短。为了简单地说明问题，我们用一个简化的模型，假设脚与地面的接触面是一个半径为 R 的圆，则单位面积的摩擦力为

$$f/\pi R^2$$

那么当转动的角度为 θ 时，摩擦力做的功为

$$W = \iint_s \frac{f}{\pi R^2} r \theta dS = \frac{2fR\theta}{3}$$

因此，接触面积越小，转动的时候摩擦力做功的速率就越慢，也就是说我们的动能被摩擦力消耗的速率越慢，故而速率减缓的速度变慢，也就会感觉转动更加轻松了。

12 洗衣机的工作原理是什么呢？

常见的洗衣机有两种：波轮式洗衣机和滚筒式洗衣机。

波轮式洗衣机：在洗衣桶的底部中心处装有一个带凸筋的波轮，波轮旋转时，洗涤液在桶内形成螺旋状水流，从而带动衣物旋转翻动从而达到洗涤的目的。

滚筒式洗衣机：滚筒式洗衣机为套桶装置，内桶为圆柱形卧置的滚筒，筒内有3~4条凸棱，当滚筒绕轴心旋转时，衣物就会被带动翻滚，并循环反复地摔落在洗涤液中，从而达到洗涤的目的。

两者的共同点都是利用机械设计让衣物和水产生振动，利用振动将衣物上的污渍更多更快地扩散到水中，水会将污渍带走起到清洁衣物的作用。洗涤剂的作用则是和污渍发生反应，使污渍可以更容易被水带走。



13 气球为什么飞不到外太空？

气球里边的气体不仅要抵抗大气压，还要抵抗气球的弹力，随着高度的上升，大气中的气体逐渐变得稀薄起来，气压会降低，那么气球内外在地面上达到的压力平衡在高空中就平衡不了了，为了平衡，气球就必须膨胀以降低内部的气压，而膨胀到一定程度就爆炸了。

如果气球的材质能逆天呢？

这个气球一路披荆斩棘，穿过了对流层、平流层、中间层，不惧电离层的各种摧残，对越发变强的紫外线视若等闲，对散逸层千度的高温一笑而过……

在考虑这些之前，让我们思考一个问题——气球为什么能飞起来？

气球能够飞起来是因为气球里面气体的密度比外部的密度要小，因此受到了大气的浮力。随着高度的增加，大气的密度也会降低，但由于气球在膨胀，所以气球内部气体的密度也在减小，因此还是能受到浮力的。但散逸层的大气密度只有海平面处的一亿亿分之一，气球怕是膨胀不了一亿亿倍吧……

结果就是浮力会与重力平衡，气球悬浮在空中。

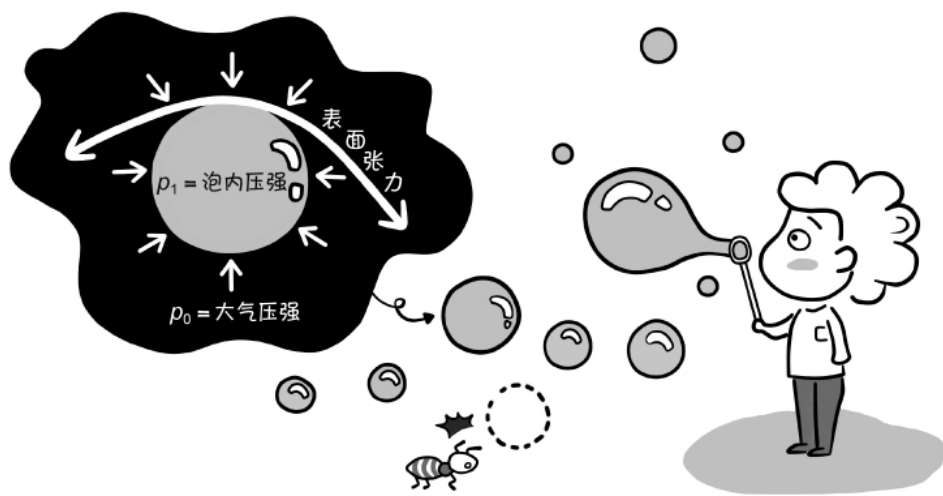


14 泡泡是如何形成的，又是怎么破碎的？

泡泡有很多种，我们以最常见的肥皂泡为例来说明这个问题。

形成泡泡的原理比较简单。液体内部分子之间存在着力，而在气液界面，这种力表现为引力，即“表面张力”。表面张力与分界线长度成正比，因此表面能就与面积成正比。我们知道系统的能量总是趋于最小值，所以失重条件下的水珠总是成球形（一定体积下球形表面积最小）。气泡的形状也是如此形成的。

下面看一下气泡形成的过程。我们以吹泡泡为例。当我们把空气吹进水膜中时，水膜鼓起，到一定体积（通常超过半球）时，开口会在表面张力作用下合拢，形成气泡。



那气泡又是怎么破裂的呢？如果单纯靠表面张力就能维持气泡的话，纯水也就能形成稳定存在的气泡了。但实际上纯水气泡很难维持，原因是气泡是否破裂是张力与水膜厚度涨落的博弈。张力太大，出现轻微的厚度涨落，受力会不均衡，水膜就会破掉。纯水很难形成稳定气泡就是这个原因。肥皂水中的肥皂就起到了减小表面张力的作用，这时水膜即使存在轻微厚度涨落，也不会使水泡破裂。当然存在了一定时间的肥皂泡，由于挥发，也会出现较大厚度涨落，泡泡就会破掉。

泡泡的问题看似很小，其实里面的学问比较大。在工程技术方面，人们经常遇到起泡不利或者起泡有利的问题，这都需要使用添加剂来改变液体表面张力，以达到想要的目的。



15 水的凹液面是怎么形成的？

液体表面有张力，会使得液体趋于收缩。当将液体放于容器中时，容器的器壁与液体表面所形成的界面也会产生张力。可以理解为容器的器壁与液体内部都会给液体表面施力，就看这两者的力孰大孰小了。如果容器壁表面张力更强一点，那么液体就会攀附上它的表面，这就是凹液面；如果容器壁表面张力比较弱一点，那么液面就被液体拉走，形成凸液面。

具体形成什么液面不仅与液体有关，还与接触的容器有关。比如将水滴在桌子上，水滴会摊开；但如果滴在荷叶上，则水滴会形成小水球。



16 为什么水龙头流下来的水，水柱会越来越细？

水柱下端的水是先离开水龙头的，而上端的水离开的时间较晚。在重力作用下，水加速下落。这样，先离开水龙头的水会比后离开水龙头的水速度要快，但速度差保持不变。当然，水的表面张力会减慢这个趋势，不过水柱上端与下端之间的距离还是会被拉大。水柱体积变大，使得水柱内部压力变小，在外界大气压强的作用下，水柱变细。



17 水滴在荷叶上为什么会滚来滚去？

这是由于荷叶表面的强疏水性。荷叶表面有一层茸毛和一些微小的蜡质颗粒，它们的尺度均是微米甚至纳米级别的。水在这些细小的茸毛和颗粒上不蔓延、不浸润，会使荷叶表面的水在其自身表面张力的作用下形成水珠。由于荷叶表面的这种强疏水性，自水珠与荷叶接触的交界面经过水珠内部到水珠与空气的交界面之间的夹角（也称为浸润角）会大于 150° ，稍有扰动，水珠很容易滚动。

由于荷叶上的水珠很容易滚动，会有一种“荷叶效应”产生。这是一种自清洁效应，滚动的水珠很容易带走荷叶表面的灰尘，使荷叶处于“出淤泥而不染”的洁净状态。



18 影视作品中经常会看到人从高处跳落到地面后有一个翻滚动作，这个动作是怎么卸去或减小冲击力的？

人在从高处落下时会不断加速，动量不断增大，而人平稳地站在地上时动量为0，因此需要通过各种途径来将动量消耗掉。如果从不太高的地方跳到地面，人可以通过屈腿来进行缓冲，通过肌肉做功来降低动量；而当动量很大时，屈腿的缓冲有限，动量就会对人体造成伤害。人在落地后翻滚这一过程中，首先是人在竖直方向获得减速的时间长了，如果从高处跳下来，落地后顺势蹲下就觉得冲击力变弱了；其次是通过姿势的调整而将动量转换为角动量，即原本是直直地落在地上的，这些竖直的动量都要被缓冲掉，现在一部分变成了横向的滚动，因此竖直方向上对地面的冲击力变小，地面给人体的反作用力变小，人体承受的负担就会减轻许多。不过这一技巧需要专门的练习，并且缓冲也是有限度的，请勿随意模仿！



19 为什么在倒果汁、牛奶时，液体总是不能连贯地流出，而是一股一股的呢？

题主说的这种情况发生于倒盒装或者瓶装（总之是硬包装）饮料的时候。因为盒内液体流出，盒内空间变大，原有气体提供的气压变小，而包装很硬，无法像袋装饮料一样变瘪，大气压与盒内压强的差作用在狭小的开口处，导致液体不能通畅流出，并且会有外面的空气不断挤入，导致液体流出不连贯。解决办法是——慢点倒。不要让液体全部堵住开口，而要留一点缝隙让空气进入。



20 为何没有意识的人，抱起来比有意识的更重？我觉得是重心引起的力矩变化造成的，能给出详细解释吗？

确实是“抱起来”更重，也就是人还是那么重，但是抱起来要费的力气更大一些。抱有意识的人，他也会主动抱着你，这时他紧密贴在你的身上，同时你的肩膀等部位也会替手臂分担一部分重量。而无意识的人身体松散，抱起来不但全部重量都要靠手臂支撑，还要花额外的力气保证稳定。比如在健身房举铁的时候，同样重量的杠铃和哑铃，杠铃举起来会更轻松一些。题主说的重心引起力矩变化也有道理，类似的体验包括，同样重的箱子，体积比较小的更好搬。

另外，还有一个因素可能是题主做实验的时候没有考虑控制变量，抱有意识的人的时候抱的是80斤的女朋友，抱无意识的人的时候抱的是80公斤的室友。下次遇到室友喝醉这种情况有两种解决方案，一种是扔下不管；另一种是像扛麻袋一样扛在肩上，应该能节省一些体力，至于这种姿势他是否舒服不重要，反正他已经无意识了。



21 请问每次大型货车、客车刹停后总能听到放气的声音，这是什么声音？

大型客车、货车在行驶过程中具有非常大的动能，想要在短时间内让它停下来需要很大的力，刹车踏板踩起来也非常硬，一般需要使用压缩空气作为辅助来帮助我们刹车。

踩刹车时，压缩空气进入制动气室推动刹车片，松刹车时，为了松开刹车片，需要将气室中的压缩空气排出，此时就能听到放气声了，刹车踩得越狠，松刹车后听到的放气声越大。



22 水银体温计的缩口到底是什么原理？

我们都知道在使用水银体温计（简称体温计）之前要拿着它的尾部使劲地甩，目的是将尾部的水银全部甩进温度计头部的水银泡中。使用时，水银泡受热，水银膨胀，水银开始上升，直到达到热平衡，水银的最高点指示的数值就是体温，接下来读数就可以了。但是，一般温度计都是放在腋下等隐秘部位，要拿出来才能读数，但在这个过程中水银泡会受到环境的影响而改变温度（一般都是变冷），如果不采取措施，水银柱高度会迅速降低，导致我们无法获取准确的体温值。缩口的出现就是为了解决这个问题，它会阻止缩口之上的水银回流到水银泡中。这样即使温度计受到环境的影响，我们也有足够的时间来读取准确的体温值。这也是我们使用体温计之前要用力甩的原因。

缩口阻止水银回流是利用水银液面的表面张力将水银拉住来实现的。由于表面张力大小和管的半径成正比，而水银柱的重力正比于半径的平方，所以缩口只有足够细的时候才能阻止水银。我们生活中也经常遇到这种情况：用很细的吸管喝饮料经常会在吸管内残留一小段液体，但是用奶茶吸管就不会出现这种情况，其中的道理和缩口阻止水银是一样的。



23 踢足球时如何做到用脚背将球稳稳停住而球不弹出去？

足球落在地上会弹起是因为足球形变将动能变成弹性势能储存起来然后又释放了出去。但是如果让足球落在柔软的沙地上或者草地上，它弹起的高度就会低很多，甚至弹不起来。原因在于柔软的地面起到了很好的缓冲作用，因此足球形变不大，储存的势能也不多，所以最终弹起的高度会低很多。

用脚背停球也是利用了脚背对足球的缓冲：虽然脚背并不算柔软，但是运动员通过调整脚部动作让脚背顺势随球移动并一起减速至停下，这样也可以起到很好的缓冲作用。要想将高速运动的足球停到想要的位置需要运动员具有高超的技巧。



24 惯性不是力，为什么常有人说惯性力？

惯性确实不是力，惯性是物体保持自身运动状态不改变的能力，只和物体的质量有关。惯性力是在研究非惯性系中物体的运动状态引入的假想力。比如，在公交车上，如果公交车向前加速，即使你没有受到其他力的作用，你也会感觉有一个力在向后推自己，所以我们引入了惯性力来研究这种情况下你的运动状态。在应用中（匀加速运动的体系），惯性力大小等于质量和体系加速度大小的乘积，方向和加速度方向相反。引入惯性力后，物体所遵循的运动方程和牛顿第二定律有相同的形式，用起来非常方便。

25 为什么指甲或者铁丝在被剪断之后会弹出很远，而不是原地掉下来？

一般来说，剪指甲并不是一个丝滑顺畅的过程，仔细观察可以发现，剪指甲的过程中，指甲先被指甲钳压变形，然后突然被指甲钳剪断。由于指甲在形变过程中储存了弹性势能，所以弹性势能的释放会让指甲飞出去。



26 为什么用一根手指可以让坐着的人站不起来？

要弄明白这个问题，就得先明白人是如何从端坐（注意一定要端坐，耸肩弯背的姿势不在考虑之列）到站起的。人在端坐时，重心位于小腿后面，臀部附近。站起过程是重心向前向上移动的过程，具体步骤是腰腹部肌肉收缩，身体前倾将重心移到与脚垂直，腿部肌肉收缩使腿站直，重心上移。

如果端坐时有人用手指抵着额头（注意是额头，如果抵胸及胸部以下的话，一根手指就办不到了），那么身体是无法前倾的，因为腰腹部肌肉在臀部附近，而身子前倾却是以臀部为支点的转动，故而腰腹部肌肉的力臂短，而抵额头的指头力臂长。这样指头用很小的力就可以造成较大力矩，以致腰腹部力量无法克服该力矩，重心不会前移。第一步没有发生，腿部肌肉无从发力，我们也就站不起来了。



27 为什么湿衣服在身上很难脱下，而光脚踩在湿的地面上就容易滑倒？

当衣服被水浸湿之后，原本那些与皮肤没有接触到的缝隙就填满了水，水对于衣服以及人的皮肤都具有较强的吸附力。另外，即便是浸湿的衣服，在皮肤与衣服之间也会存在一点空气，增加了表面积，使得表面张力大大增加，从而导致衣服不容易被脱下。比如湿袜子不好脱，但是当把脚伸到水里脱就很容易脱下去了。

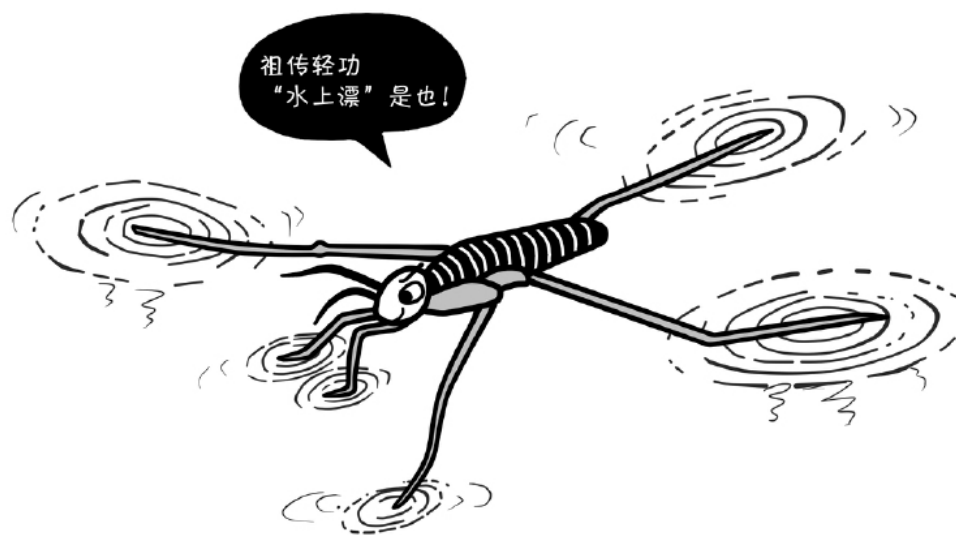
至于光脚踩在湿的地面上会打滑，首先这一地面即便是干燥时也具有较小的摩擦因数，也就是说并不是任何湿润的地面踩上去都容易滑倒。容易滑倒的地面其表面比较光滑，因此此时水分子的作用更多的是润滑。



28 水黾为什么不会沉下去？

水中物体，受到的浮力等于排开的水的重量。所以对实心物体而言，如果其密度大于水的密度，浮力就无法支撑其重力，物体下沉；反之，物体则漂浮在水面上。但有一些情况例外，小心放置密度比水大的小物件（如回形针、硬币等）于水面，它们也会漂浮在水面上。这里的浮力不足以使小物件漂浮，而使其漂浮的是另外的力——表面张力（顾名思义，这个力只有液体表面存在，液体内部是不存在的）。像水球的形状、毛细现象等，均与表面张力有关。

水黾之所以会漂浮在水面上，是因为它充分利用了水的表面张力。一方面，水黾腿部狭长，使其自身重量被有效分散；另一方面，这类动物身体表面一般都有一层拒水绒毛，使其身体始终处于水的表面。



29 为什么玩滑板时，猛然向上跃起，滑板也会跟着向上运动，就像粘在脚底？

问题中所说的动作被滑板爱好者们称为豚跳（Ollie）。首先将后脚移到滑板后翘的末端，身体下压，准备起跳。然后用后脚压板，前脚起跳，这时滑板相当于一个支点在后轮的杠杆，在后脚向下的压力作用下，滑板的前端上翘。一方面，当滑板后翘触及地面时，后脚起跳，在惯性的作用下，滑板继续上升，此时整体已经离开地面；另一方面，当滑板前端碰到跳起的前脚时，前脚外翻脚背，并向滑板前翘移动，给予滑板平行于板面向上的滑动摩擦力，可以进一步将滑板“拉升”。最后用双脚将板面踩平，人和滑板一起下落至地面。虽然说物理过程不难，但过程中对身体的协调性和时机的把控度要求较高，需要大量的练习。



30 用相同的力转动一个生鸡蛋和一个熟鸡蛋，为什么熟鸡蛋转动的时间更长？

熟鸡蛋内外是一个不分离的整体，当其转动时，形状不变、性质不变，可以看作一个刚体，给定一个初速度，其转动时只要找到合适的转轴就会稳定地转起来。

生鸡蛋的壳是固体，里面的蛋清和蛋黄都是液体，转动时，由于其整体不连接，内部的液体部分由于惯性作用会有逐渐加速的过程，这个过程会由于阻力的产生有能量耗散。而且其旋转时，鸡蛋内部由于密度不均匀，蛋液会向蛋壳不规则流动，导致转动惯量依赖转速而变化，引入一个不稳定因素，因此，相比之下，熟鸡蛋转动的时间更长一些。

31 溜溜球甩出去，为什么能自己滚上来？

溜溜球（Yo-Yo），又称悠悠球，是一项花式纷繁、极具观赏性的手上技巧运动。据传，它起源于菲律宾狩猎民族在狩猎和战斗时所使用的武器——绳子前端悬挂着重物，并且“Yo-Yo”在菲律宾的土语塔加路语中是“回来”或“去回来”的意思。那么，溜溜球在甩出去之后是如何回来的呢？

传统的溜溜球中单股绳直接系在轮轴上，将溜溜球的轮轴和轮盘看作一个刚体，在溜溜球被向下甩出的过程中，在重力和人给予的初始冲量的作用下向下运动，同时由于重力和绳子对其的力矩作用开始转动，重力势能逐渐转换成平动动能和转动动能，随着重力势能的减少，下落的速度越来越快，转动的速度也越来越快。当细绳全部展开后，下落速度和转动速度达到最大值，这时原来的重力势能完全转化为平动动能和转动动能。

由于转动惯性的作用，在最低点时溜溜球还会继续旋转，但此时细绳已经全部展开，溜溜球已不可能继续往下走，由于细绳与轮轴是固连的，继续旋转就会从另一个方向开始缠绕细绳，开始爬升，即所谓的“自己滚上来”。但由于细绳不是完全弹性体，在溜溜球转向的过程中平动动能有所损失，在向上运动时不会回到初始位置，因此需要在初始时将悠悠球“甩”出去或在最低点时迅速提一下细绳以补充能量损失。

为了使溜溜球在最低点处悬停足够长的时间来完成一些高难度动作，人们发展了一系列现代化溜溜球——轴承型、离合型溜溜球等。其原理与现代溜溜球基本一致，细绳与轮轴没有直接固连，在最低点时轮轴能够继续克服细绳对其的摩擦力旋转而不缠绕细绳。为了使溜溜球滚上来，有时需要提一下细绳，使得轮轴与细绳接触的地方压力增大，对应摩擦力增大，大于静摩擦力时会使细绳开始缠绕轮轴，进而开始爬升，回到玩家手中。

32 为什么放风筝放到一定高度要收线再继续放长呢？

极限情况下考虑一直放线且放线速度极快，以至于不对风筝产生力的效果，则风筝在不考虑重力的情况下会随着风一起做相对静止运动，对于一般的对流层来说，风筝会越飘越远。当然，这是在绝对理想的情况下。对于低空下的飞行来说，由于周边建筑和地形的影响，其空气流不稳定导致风速和方向都不稳定，又由于风筝本身的重力作用，风筝会掉下来。

此时由于风筝需要迎风前进一段，由于本身和水平方向有一个夹角，在迎风移动的过程中，气流会给风筝带来更大的向上的升力，于是风筝的垂直高度会有所增加，同时线短了，线和地面形成的夹角增大了，随后适当放长一段线可以让风筝在更高更远的地方重新达到一个平衡点，反复这个过程，风筝就可以飞得又高又远。



33 怎样最快地把装满水的瓶子里的水全部倒出来？是直接把瓶子倒过来快，还是倾斜一定角度（水不把瓶口封住）快？

当你把装满水的瓶子倒过来，水当然会流出来。瓶内的气压会越来越小，瓶内外的压强差会阻碍液体进一步流出。题主给的方法是倾斜一定角度，尽量不让水把瓶口封住，这确实是个好办法，因为这样可以始终保持瓶内外压强大小一致，但是这样就不能充分利用重力。

还有一种办法是边转动瓶子边倒，因为转动形成的涡旋可以将瓶内外的空气连接起来，这样既能保证瓶内外气压平衡又能充分利用重力。当然，还可以狂甩把水甩出来，就像洗衣机甩干衣服一样。



34 如何摆脱地心引力？

只要你跑得足够快，地球就抓不住你。

宇宙中每一个物体都以一定的力吸引着其他物体，这就是传说中的万有引力。

对于一个人来说，如果想要摆脱地心引力，根据引力定律，有四种方法。

方法1：将地球的质量变为0。要想做到这一步，虽然方法有很多，比如说将地球质量离散化，不断抛出一块块到外太空，直至质量为0，但这样实施起来并不简单，而且可能会让你成为全人类的公敌。

方法2：将你的质量变为0。这可能难以实现，但是最简单的方法是，你的思维是没有质量的，其本身是不受地心引力影响的，所以，请让你的思维自由思考飞翔吧（这也可能是成本最低的方法了）。

方法3：将地球的质量转变为人的质量。你可以努力吃土，等到地球的质量为0，你的质量为两者质量之和时，你就完全不受地心引力影响了。

方法4：增大你与地球之间的距离，当这个距离趋近于无穷时，引力就可以忽略不计了。根据万有引力定律，当把航天器以超过第二宇宙速度（11.2km/s）发射之后，它就会脱离地球的引力场而成为围绕太阳运行的人造卫星。当达到第三宇宙速度后，它就会脱离太阳系，飞翔于浩瀚的宇宙。



35 如果压力足够大，水可以被压缩吗？

可以。压缩性是流体的基本属性。任何流体都是可以被压缩的，只不过可压缩的程度不同而已。液体的压缩性都很小，随着压强和温度的变化，液体的密度仅有微小的变化，在大多数情况下，我们可以忽略压缩性的影响，认为液体的密度是一个常数。

水作为液体也是可以压缩的。从分子和原子尺度上考虑，水分子和水分子之间具有一定的空隙，氢原子和氧原子之间也存在距离，但分子或原子间很强的作用力使得其难以被压缩，不过还是可以压缩的。一个很好的例子是在重力作用下，深海中的水被其上部的水压压缩，其密度比海面水的密度大。



36 为什么钢化玻璃敲边缘比敲中间容易碎？

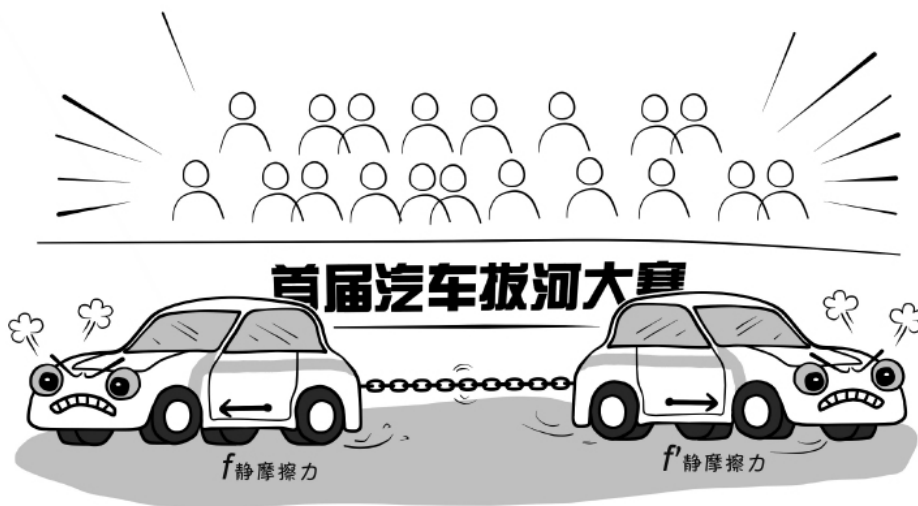
先介绍一下钢化玻璃是怎么生产出来的。一种生产钢化玻璃的方法是将普通退火玻璃加热到软化温度，然后再将其急速冷却。在急速冷却过程中，玻璃表面被冷却至退火温度以下，快速硬化，形成固态外壳；而内部的玻璃还处于液态，慢慢冷却时会拉着固态外壳收缩，让表层玻璃（固态外壳）受到巨大的压应力，相应地，内部的玻璃则被固态外壳拉向四周，受到的是张应力。“鲁伯特之泪”也是出于这个原理。

当钢化玻璃受压时，外力首先要抵消玻璃表层的压应力，从而提高了玻璃的承载能力。因此，我们可以知道，钢化玻璃抗冲击性能好的原因是其表面具有压应力。但是钢化玻璃的边角区域往往会应力集中，属于比较脆弱的区域，因此敲击边缘容易碎。汽车的侧窗玻璃就是钢化玻璃，细心点就能发现，逃生锤的使用指南上说要敲击侧窗玻璃的边角，原因就是敲击侧窗玻璃边角容易使玻璃出现裂缝，进而应力释放会让整块玻璃碎成渣渣，便于逃生。



37 两辆车拔河（车头相反），到底是车重还是马力决定谁拉动谁？

先公布答案，车重和马力都不能单独决定谁拉动谁。先看下图，可以将两辆车拔河的场景抽象成图中的模型。



谁能胜出的决定性因素是地面给谁的摩擦力大。这个摩擦力决定于车和地面之间的最大静摩擦力（由车重和轮胎以及地面的性质决定）以及车能给地面的最大横向作用力（取决于车的扭矩，一般来说，马力大的车扭矩也小不了）。那么两者在拔河过程中分别起到什么样的作用呢？最大静摩擦力限制了地面施加给车的横向作用力的最大值，而扭矩决定了汽车可以将最大静摩擦力的潜力发挥出来多少。

听起来非常拗口吧？下面用两个极限情况下的例子来讲解。

1. 两辆车，一辆车的扭矩很大，停在绝对光滑的地面上；另一辆车的扭矩很小，停在粗糙的地面上。很显然，地面不会给第一辆车任何横向作用力，所以第二辆车轻松胜出。因此，扭矩大也有可能输。

2. 一辆车和一座山拔河。山的扭矩是零，车的扭矩不为零。可想而知，车永远拉不动山，但反过来看，虽然山永远不会输，但是也永

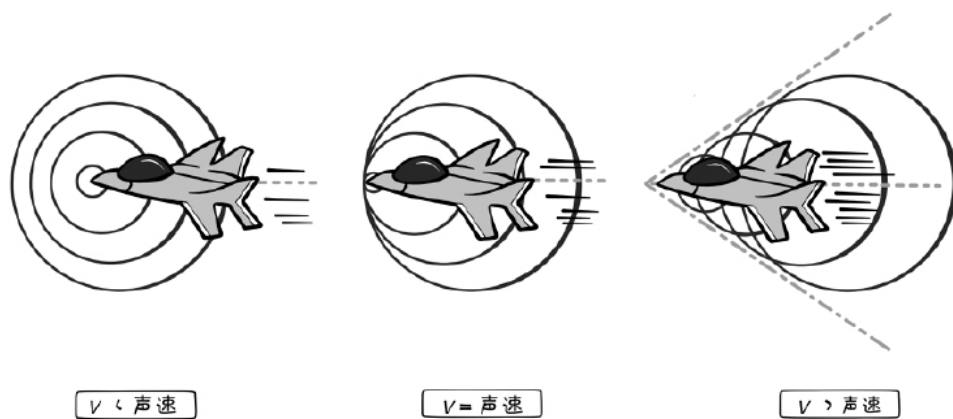
远不能将车拉动。因此，最大静摩擦力大不见得能赢，但一定不会输。

综上，在简化模型中，最大静摩擦力和扭矩的其中一个因素并不能决定谁会赢，只有最大静摩擦力大、扭矩又大的一方才一定会赢。其他情况还要具体分析才行，不再赘述。在实际情况中，我们还要考虑力的作用点和作用方向等因素，问题会变得更加复杂。

声学篇

01 能解释一下音爆现象吗？

音爆通常是飞机等物体在速度超过声速（或者发生爆炸）时，伴随而来的一种发出巨大声响的现象。要解释这种现象，就要有一定的波动知识。我们知道声音是一种机械波，它是密度振荡的传播。声音具有一定的传播速度，具体数值与介质相关。我们以声音在空气中的速度为例（约340m/s），这是密度振荡在空气中的传播速度。如果声源（如飞机）的速度等于或者超过声速，那么由物体运动所引起的密度压缩将无法向前传播。其结果是在物体与空气的接触面形成一层很薄的压缩层，压缩层内密度大，温度高，这就是所谓的激波。压缩层与层外空气在密度和温度上都有跃变。当压缩层经过普通空气时，空气的密度、压强会有一个跃升跃降的过程，该过程有大量能量释放，发出巨响。这就是所谓的音爆了。



有趣的是，在激波形成过程中，由于其激波层内的压强骤增，空气中的水蒸气会凝结成小水滴，形成美丽的音爆云。喜欢军事或者空战电影的同学对此一定不陌生。

其实音爆现象在日常生活中蛮常见的。我们在广场时不时碰到有人抽陀螺，总会听到“啪”的声响。这就是鞭子的尾端瞬间超音速发出的音爆声。

02 为什么在打电话时对方能听到你的声音？为什么手机等音频设备能录入人的声音？

在生活中，你听到声音是因为声源发出的振动经过空气的传播进入你的耳朵，然后空气引起鼓膜振动，鼓膜的振动经过神经传入大脑，这样你就听到了声音。所以你直接听到的是传播到你的耳朵里的振动。

可以想象，如果可以制造和某种声音一样的振动，即便声源不存在，那么对于你来说，听到的声音和声源发出的声音是没有区别的。电话可以把说话人造成的振动包含的信息通过电磁波传递给接收信号的电话。电话接收到信号后，又通过扬声器重现了说话人造成的振动，这样你就可以听到对方说的话了。

手机录入人声的原理，简单地说就是，录音设备把人声转换成相应的数字信号，然后把数字信号记录在芯片里，需要重现声音的话，只需要读取芯片里的数字信号来模拟录入的声音就可以了。这就像你根据别人的朗诵用笔记录下内容，然后自己再把它读出来：你直接记录的并不是声音，但是你可以通过记录的信息重现听到的声音。



03 为什么听手机录入的自己的声音和自己真实的声音差别很大？

手机在录音与播放录音的过程中会有少许的失真，但这并不是这个问题的主要原因，非本人听到手机录音会认为这种声音与直接对话时听到的声音差别不大。

那么真正原因又是什么呢？

根据声音的传导方式，人听到的声音有两个来源：空气传导和骨传导。可以做这样一个小实验来感受骨传导的存在：首先捂住自己的耳朵，使自己几乎听不到别人的声音，其次用很小的声音说话，会发现自己能够很清楚地听到自己在说什么。

声带是身体的一部分，所以振动发声时，骨传导的效果明显，而外界空气传导来的声音几乎不会引起骨传导。人听到的自己说话的声音是空气传导与骨传导的合效果，其中骨传导占主要作用，而录音则只有空气传导，因此听起来感觉不一样，差别很大。



04 响指是如何打响的？

要想知道响指如何打响，首先就得分析出响指的声源在哪里。我们晓得声音是靠机械振动产生的。那么响指的声源在哪里？指头？显然不是，指头的振动频率达不到人耳可听到的程度。

其实响指的声源在于手指与手掌形成的空腔。以中指拇指响指为例，无名指和小指与手掌形成空腔。中指的快速拍打引起空腔内气柱的振动，产生具有一定频率的驻波，发出声响。这一点很容易证明，当把空腔打开时，就听不到响指的那个声响了。



05 麦克风为什么能让声音变大？它是怎么转化我们的声音内容的？

麦克风其实并没有把声音放大的功能，麦克风的作用只是收集声音信号，真正把声音放大的是音箱。

首先，麦克风通过传感器把声音的机械信号转化为电信号。此时的电信号中含有很多噪声，所以需要先对其进行滤波和降噪操作，再通过有线或者无线传输的方式传给音箱；其次，功率放大器将电信号功率放大；最后，喇叭再将电信号转化为声音信号释放出来，此时喇叭释放出来的声音的功率就要比原始声音大。

这个过程中，让声音变大的主要模块是功率放大器，其主要原理是通过三极管的电流控制作用或者场效应管的电压调制作用，将电源的功率转换为按照输入信号变化的电流，也就是将输入信号的电流放大。



06 请问，顺风时，声音的传播速度会不会变快？

假设风的各个部分定向运动的速度相同，那么顺风时，声音的传播速度会变快。

声音在空气中是怎么传播的呢？声源振动引起附近的空气分子振动，这些空气分子又会引起它旁边的空气分子振动，振动通过空气分子向远处传播，这就是声音的传播方式。声音传播的速度——声速，与空气本身的性质（包括气压、湿度等）有关。

风是空气分子定向运动引起的，在和风速度相同的参考系中观察，风就是一团静止的空气，在这个参考系中，声速就是正常的声速（大约340m/s），但是如果站在地面上测量，声速还要叠加上参考系自身的速度。因此，地面上测到的声速就变大了。

沿风速方向的声速增大还会造成声波向风速方向聚拢。“顺风而呼，声非加疾也，而闻者彰”，说的就是虽然声音没有变得更洪亮，但是可以让更远的人听到，这就是风速改变声速的结果。



07 共鸣腔为什么能提高声音的响亮程度？

共鸣是日常生活中常见的现象，很多歌手在唱歌的时候会利用共鸣来控制与加强自己的声音。鸟类通过控制鸣管引起不同的共鸣唱出婉转的歌声，很多乐器也会通过共鸣发声，但是为什么共鸣腔会加强声音呢？这个能量又是从哪里来的呢？

共鸣腔是通过声波在共鸣腔内部来回反射形成驻波来加强声波的，改变共鸣腔的形状可以改变腔体内发出的声音，如鸟类通过控制鸣管的变化来发出音调多变的鸣叫。

说得更准确一点，共鸣提高的是声音在特定频率上的强度，并且这个频率跟共鸣腔的形状和材质密切相关。共鸣之所以能提高某一频率的声音强度，是因为这个频率与材料的固有频率一致，外界声音的能量可以在这个材料的固有频率上不断叠加起来。这就好像你在推秋千，秋千振荡的频率与坐秋千的人的体重和秋千的线长有关。但如果你推秋千的频率刚好与秋千自己振荡的频率一致的话，那即使你每次推的力气不大，秋千也会把你每次推的能量叠加起来，越荡越高。



08 一段绳子在两端同时摇，绳子会在中间相互抵消归于平静。我想知道声波可以吗？如果可以，能不能用于整治噪声污染？

这里涉及了波的叠加原理：在两列波重叠的区域内，任何一个质点同时参与两个振动，其振动位移等于这两列波分别引起的位移的矢量和。声波也是波，满足波的叠加原理。

如选择两束合适的声波进行叠加，一个区域内的声音可以大幅减小。这也正是主动降噪耳机的工作原理：降噪系统可以针对外界的噪声产生合适的声波，两者叠加刚好使噪声消失，这样可以大大提高耳机的性能。当然，如此有科技含量的耳机往往很贵。

虽然主动降噪的原理很简单，但是如果大规模使用的话，成本会非常高，所以一般不用这种方法整治噪声污染。



09 通过耳朵来判断声源一定准确吗？

不一定准确。

人类利用双耳效应来判断声源的位置时，人的两只耳朵在头部的位置不同，朝向也不同。同一个声源发出的声音在任何一只耳朵听来都是不一样的，我们利用这种区别可以判断声源的位置。所以只要能模仿这种差别就可以骗过耳朵。比如在回声时，声音听起来好像是从声音反射的位置发出的，但是真正的声源并不在那里。

光学篇

01 请问激光如何分类？为什么有的激光能够透视，有的能够切割？它们本质上有什么不同吗？

激光是20世纪以来人类的重大发明之一，被称为“最快的刀”“最准的尺”“最亮的光”。

激光可按功率、用途、连续与否、脉冲时长、产生方式、发光波段等许多方面进行分类。其中，按照波段可分为红外波段、可见光波段、紫外波段、X射线波段等类型。

本质上讲，激光产生的微观机制与普通光不同。比如白炽灯发光是自发辐射，各原子跃迁发光时彼此没有强烈关联。而激光则是受激辐射并放大，在辐射场的作用下，激发态的原子向低能级跃迁发光，这些光的频率、相位、传播方向、偏振状态相同。这导致激光具有优异的相干性、方向性，也可以达到很高的强度。

如果该激光处于X射线波段范围，由于其能量高、波长短，甚至小于原子间距，可以穿透物体，又因为不同物质中电子密度和分布不同，透射率有差异，所以可以实现成像。如果该激光处于可见光或红外光波段，可以像雷达那样，探测其发射后再次返回的时间，或者利用其良好的相干性，探测其被散射后的光场分布，经过计算，一定程度上重建出障碍物后物体的形貌，这也可以算是另一种形式的“透视”。而如果激光强度极大——最好处于红外波段，则具有明显的加热效应，可以将材料迅速加热至熔化甚至汽化，实现激光切割。



02 为什么买的红色激光笔看着光点好像有许多小红点在动？

这种斑点称为激光散斑，是由激光发生干涉形成的。

一般来说，激光笔照射的平面表面都有微小的凹凸不平，粗糙表面可以看作由不规则分布的大量面元构成，相干光照射时，不同的面元对入射相干光的反射或散射会引起不同的光程差，反射或散射的光波动在空间相遇时会发生干涉现象。当数目很多的面元不规则分布时，我们可以观察到随机分布的颗粒状结构的图案，也就是所谓的激光散斑。



03 验钞机发出的是紫光，但此光并不是紫外线，那么验钞机发出的究竟是什么光？

首先明确一点，紫光不是紫外线。常见的验钞机能够明显地看到其发出的紫光，但这并不是用于验钞的紫外线，紫外线不属于可见光，我们是看不见的。但需要强调的是，验钞机确实发出了紫外线，它辐射的光的能量主要集中在紫外波段（波长约为365nm）。

下面先简单介绍一下验钞的原理。我国的人民币采用的是专用纸张，该纸张在紫外线照射下是不会有荧光反应的。但市面上能买到的纸张都会有荧光反应，在紫外线的照射下会发出紫光 and 蓝光。因此，直接测量纸张有无荧光反应即可辨别纸币的真伪。另外，纸币上也用特定的荧光油墨写了一些标记，这些标记在紫外光照射下也会显现出来，帮助我们用肉眼识别真伪。

紫外线是在可见波段之外的，那我们又是怎么看见紫光的呢？

对于常见光源来说，它发出的光都不会只有某一个特定波长，其光谱都会有一定的带宽。而验钞机光源发出的光，正好覆盖到了可见光波段的紫色部分。当然，我们可以通过技术手段去消除紫色可见光，但那样的成本会比较高，得不偿失。况且紫光本身波长已足够短、能量足够高，也可以激发出绿色、红色等波长较长的荧光。另外，我们还可以根据紫光是否存在，判断验钞机是否正常工作，所以我们就对紫光的存在宽容些吧。

04 为什么用微波炉加热食物时不能用金属餐具？

微波炉主要通过加热食物中的水分子来加热食物。如果使用金属餐具盛放食物用微波炉加热，一般会遇到三个问题。

1. 加热效果差。因为金属可以屏蔽电磁波，本来应该照射在食物上的电磁波就会被金属器皿挡住，导致食物不能被充分加热。

2. 金属餐具发烫。金属不仅会屏蔽电磁波，还会吸收电磁波，电磁波会在金属中诱导出电流，电流会让金属大量发热，这时餐具在某种意义上讲就成了一个电磁炉。

3. 可能会产生电弧。金属餐具在电磁场中会产生响应，导致金属表面的电荷重新分布，在电荷密度大的地方容易发生击穿而产生电弧。电弧可能会引燃食物里的可燃物，还有可能会对微波炉本身造成伤害。



05 如何从物理学角度解释玻璃是透明的？

我们知道光入射到任何材料上，都会产生吸收、反射、散射等现象。

玻璃属于绝缘体，导电性较差，因此我们不需考虑和金属一样由外部自由电子导致的强烈的反射。玻璃为均质的非晶体，因此散射作用也不会很明显。

玻璃的主要成分为二氧化硅、硅酸钠、硅酸钙等，是一种高度无序的非晶体。从晶体角度结合光吸收可以解释二氧化硅为什么是透明的。

二氧化硅，也就是我们常见的水晶，带隙为 5.2eV ，可见光波长为 $400\sim 700\text{nm}$ ，由德布罗意公式可以计算得到可见光能量为 $1.6\sim 3.1\text{eV}$ 。因此可见光波段的能量太小，不足以使电子跃过二氧化硅的带隙，因此，二氧化硅在可见光波段可以被认为是透明的。当然，如果主要考虑吸收，则任何晶体都不能对所有波段的电磁波透明。

06 为什么被水打湿的纸张比干纸张的透光性好？

首先我们需要明确纸的成分，我们平时用的纸是经过一系列复杂的工艺造出来的，主要由纤维素和填充料构成，有的纸会加一些钛白粉以使其看起来更白一些。那为什么纸被打湿以后看起来会更“透明”一些呢？

当纸没有被打湿的时候，纤维素和填充料错综复杂地纵横交错在一起，纤维素的折射率为 $1.466\sim 1.485$ ，与空气折射率（非常接近1）相差较大，所以经过折射以后光线传播路径会发生较大改变，加上错综复杂的界面分布，光线就被折射到四面八方去了，所以人眼看起来，纸是不透明的。但是当纸被水或油浸湿以后，因为水的折射率为1.33，与油（ $1.4\sim 1.5$ ）跟纤维素比较接近，纸就变成了比较均匀的结构，光线在纸—水界面上传播路径的变化并不大，同时水（油）还把纸“高低不平”的表面填平了，使得整个纸的结构变得像玻璃一样，透光率就大大提升了。衬衫被汗水浸湿之后的透光原理与此类似。



07 近视的人不戴眼镜，用镜子反射看物体，为什么也看不清？

用镜子反射看物体时，虽然你的眼睛离镜子很近，但是镜子所成的像和你的距离很远。平面镜成的是等大的虚像，也就是你看到的像和直接观测时看到的物体是一样大的。物体和你的距离并没有改变，还是之前那么远，因此平面镜并不能帮助近视的人望远。

我们在测视力的时候，经常会遇到房间大小不够的情况，这时候医生就需要借助镜子，通过镜子里的视力表来测视力。

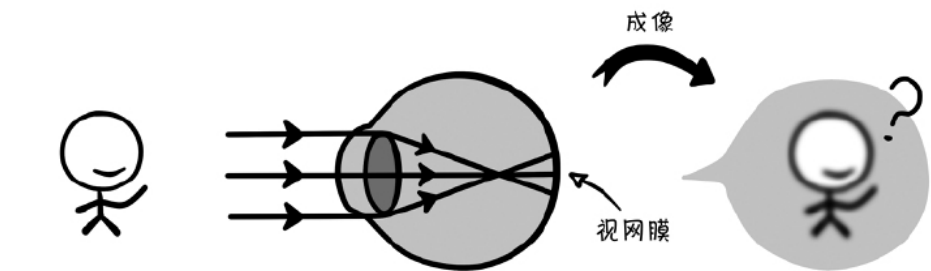
08 我是近视眼，摘了眼镜之后看不清东西，但是透过拳头的小孔还是能看清一些，这是我眼睛眯起来的原因还是小孔成像的原因？

近视眼的同学透过拳头形成的小孔能够看得更清楚些，其原理与眯眼是一样的。

健康人的眼睛，焦平面与视网膜是重合的，近视眼的同学由于晶状体变厚，焦面前移，没有与视网膜重合。远视眼就是焦面到了视网膜的后方，也没有与视网膜重合。

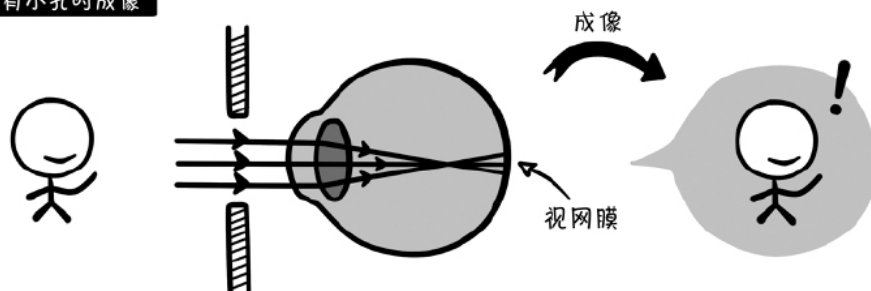
远处的光射入眼睛时，经晶状体折射在焦面上成像，正常人的眼睛正好成像在视网膜上，通过视神经感光，将信号传给大脑。如果近视，那么由于焦面前移，在视网膜上像点会变大，不同像点交叠，呈现出模糊的像。这时如果限制入射光的宽度，那么在视网膜上的像点会变小，这样就减少了各像点之间的交叠，使图像更清晰，此外，将入射光局限到傍轴范围内，也可以一定程度上减小像差。

小孔成像是直接透过小孔不经折射地成像。而光线进入人眼，是经过晶状体折射的，显然不是单纯的小孔成像。



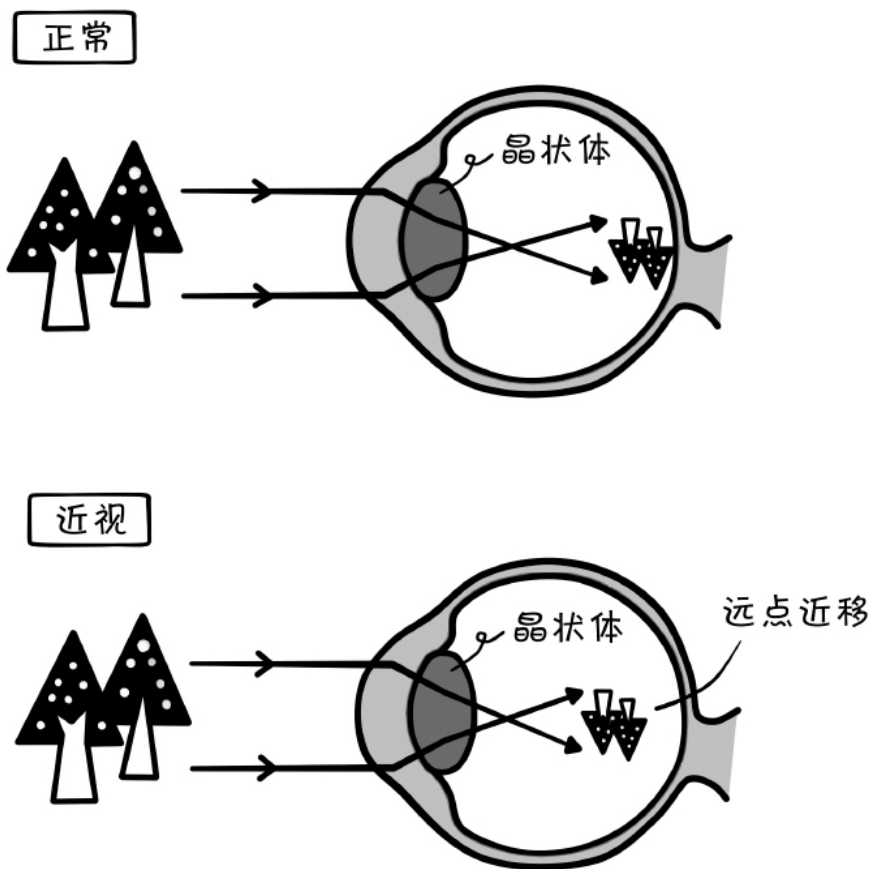
近视眼成像

有小孔时成像



09 人老了会又近视又老花眼吗？

老花眼实际上是随着年龄增长，眼球晶状体逐渐硬化、增厚，而且眼部肌肉的调节能力也随之减退，导致变焦能力降低造成的。我们知道，人眼是通过睫状肌来调节晶状体的曲率，进而来调节眼睛的焦距的。看近处的物体时，人眼的焦距短，看远处时，焦距长。眼睛能够看到最近的物理的距离称为近点，而能看到最远的物体的距离则为远点。正常的眼睛远点是无限远的，近视之后远点会近移，就是说远处的物体以前随随便便就能看得一清二楚，现在必须离近点看了。对于近点来说，幼年时在眼前7~8cm处，成年后约为25cm，到了老年之后会移到1~2m。近点变远的表现就是离得近看不清，但这个和远点变近是不矛盾的，因此可以既远视又近视，所以老花眼的人同时也可以近视。



10 为什么在水里睁眼看东西会看不清？

正常人在水中是远视眼。在人眼中，晶状体会把外界的光线汇聚成像到视网膜上，视网膜上的感光细胞会将信号通过神经传递给大脑形成视觉。因此，晶状体在视网膜上成像的质量好坏是人能否看清物体的关键。由于水的折射率大于空气，所以习惯了在空气中看物体的人眼进入水中之后就会难以将光线汇聚成清晰的像，这就是人在水中看不清的原因。



11 为什么眯着眼看灯光会有光柱的感觉？

眯眼的时候，上下眼皮之间的距离越来越近，你所能看到的视野也越来越狭窄，这个过程相当于透过一个狭缝来看外边的景象，并且这个狭缝越来越窄。

通常情况下，我们并不能观察到光的干涉、衍射现象，其中有一个很重要的原因是光传播时所经过的物体的尺度都远大于光的波长，这种情况下物体对光的影响就微乎其微了，光几乎是沿着直线传播。但如果物体的尺度和光的波长相当时，情况就不一样了。

我们平时所看到的各种各样的光并不是单色光源，这些光源发出的光是断断续续的，有随机的时间差，它们是不相干的。或者说，即便发生干涉也是各种各样的干涉的叠加，综合起来相当于没有。法国物理学家菲涅耳在惠更斯的光学理论上进一步完善，提出了子波相干叠加理论，又称为惠更斯-菲涅耳原理。这个原理的表述为：同一波面上的每一微小面元都可以看作新的振动中心，它们发出次级子波。这些次级子波在空间某点相遇时，该点的振动是所有这些次级子波在该点的相干叠加。

所以，如果狭缝的尺度足够小，那么透过狭缝的那部分光便几乎是相同的光，它们是相干的。

此时如果考虑光从狭缝穿过的传播情况，就需要考虑光的波动性了，光会发生单缝衍射，在视网膜上形成明暗相间的条纹，最中间是亮条纹，其宽度大、亮度大，其余的次级亮条纹强度很小。

最中间的亮条纹的宽度要比狭缝宽，这就是眯眼所看到的光柱，而这一亮条纹的宽度与你眯眼的缝隙宽度成反比，所以越眯眼，光柱就会越宽。



12 用非2B铅笔或中性笔涂机读卡可以被识别吗？

现在的机读卡主要是利用红外线感应碳（石墨）技术，这种技术检测的是所涂色块的两个指标：碳浓度和面积。只有这两个指标同时达标才会被识别为有效记号。如果使用**HB**铅笔或者中性笔涂写，可能会因为碳含量不够而造成检测失败。读者可能会问为什么不使用含碳量更高的铅笔，那是因为那样的铅笔涂出的笔迹很容易被蹭花而影响卡面整洁，进而影响识别效率。

当然，机读卡所用的原理并不是只有这一种，并且，就算是使用红外线感应碳（石墨）技术也不是完全不能识别非**2B**铅笔的笔迹，为了不造成不必要的麻烦和损失，请一定要按照考场要求准备涂卡笔。



13 为什么肥皂泡有彩色条纹？

肥皂泡并不总是彩色的，有时候它也会是无色透明的！

我们先说说肥皂泡为什么会是彩色的。太阳光并不是单色光，经过棱镜折射之后，它会被分成7种颜色，这是因为不同波长的光在介质中的折射率不一样。肥皂泡的表面相当于一层薄膜，而这层薄膜的折射率和空气是不同的，因此光照过来之后会发生反射与折射，并产生干涉条纹。因为太阳光是复色光，所以会有不同颜色的条纹叠加在一起，形成了混合的彩色，我们通常称它为薄层色。

当一束光从空气射到薄膜上时，一部分发生反射，另一部分透射进薄膜里，而到了薄膜里的光在到达薄膜的下表面时又会被反射回来一部分。这两次反射的光是从一束光分出来的，因此是相干的，会产生干涉。从空气到薄膜这一过程的反射与从薄膜到空气这一过程的反射是不同的物理过程，会产生额外的光程差，即波长的一半，这便是所谓的半波损失。

如果薄膜的厚度非常薄，远小于光的波长，则两束光的光程差便只有波长的一半，会发生相消干涉，因此在反射光中便看不见薄膜了，而透射光没有额外光程差，所以此时薄膜便是透明无色的。



14 夏天阳光很猛烈的时候，在高速公路上开车，为什么会看到前方一两百米远的地面在反光，好像有积水一样？

高速公路上比较宽阔，如果不刮风的话，则空气的流动会相对比较稳定，越接近地面的空气温度越高、密度越小，即从上到下空气的密度在逐渐减小。

光在不同折射率的介质中传播时会发生折射，光从折射率大的介质向折射率小的介质传播，当入射角达到某一临界角度时会发生全反射。

光在地面传播的时候，越靠近地面空气的密度越小、折射率越小，因此将不停地发生折射，当角度达到临界角时便发生了全反射。此时地面上发生全反射的空气层就相当于一面镜子，可以反射光，因此其亮度将比没有发生全反射的地面亮得多，并且还能看到倒影，在视觉上就像是一摊水。



15 请问人造光大致分为哪几种，分别有什么特点，与太阳光相比有什么不同，能不能使植物进行光合作用？

人造光是由人工设计制造的仪器、设备产生的光。按先后出现顺序，人造光源可以分为火把、油灯、蜡烛、白炽灯、低压汞灯、高压氙灯等，当然还有激光。

火把、油灯和蜡烛都是利用物质燃烧产生大量光和热的原理，通过控制其燃烧速率使其可以稳定持续地发光的；白炽灯利用热辐射的原理通过对物质加热，使其达到白炽状态，辐射出可见光；低压汞灯通电后释放紫外线，可直接用于消毒杀菌，也可用于激发荧光粉发出可见光；高压氙灯是灯内两个电极在电场的作用下，电流通过一种或几种气体或金属蒸汽而放电发光的；激光主要利用的是受激辐射光放大的原理发光的。

这些光源发出的光线与太阳光的主要区别在于其光谱差异。太阳光指的是太阳所有频谱的电磁辐射。我们通常讨论的太阳光是经过地球大气层过滤后照射到地球表面的太阳辐射，主要包含紫外线、可见光、红外线等，光谱整体上连续，但中间一些波段会因大气中各类分子的吸收而变弱。日常用的白炽灯光谱是峰值波长在红外波段，但整体覆盖可见光范围的连续光谱。荧光和气体放电灯光谱都是不连续的，前者与荧光粉的种类有关，后者与电流密度的大小、气体的种类及气压的高低有关。

光线能否使植物进行光合作用，主要考虑的也是光谱的分布。植物光合作用主要靠可见波段的光来进行，波长390~410nm的紫光可活跃叶绿体运动，波长600~700nm的红光可增强叶绿体的光合作用。因此，只要含有这个频谱的光就可以使植物进行光合作用，即人造光是可以使植物进行光合作用的。当然，为了植物的健康生长，我们还是不要用激光来使植物进行光合作用啦！



16 平面镜成像，为什么是与实物左右颠倒而不是上下颠倒？

这是一个文字游戏。找一面镜子站在前面，镜子中你的头对应你的头，你的脚对应你的脚，你的左手对应你的左手，你的右手对应你的右手，两只手并没有颠倒过来，凭什么说镜像是左右颠倒的？不对！左手分明对应的是镜子里的右手啊！这是因为你左右定义有偏差。现在请我们把两只手换一种命名方式。请你用自己的左手狠狠打自己一巴掌，并把这只手重新起名为“坏手”，一定很疼吧！再用你的右手揉一揉，这只手改名为“好手”。你看我没有骗你，镜子里的“坏手”和“好手”与镜子外也是对应的。虽然挨了一巴掌，你一定还是很迷惑，为什么镜子里的“好坏手”左右颠倒了呢？接下来请让我道明真相：镜子里颠倒的既不是上下也不是左右，而是前后。

镜子里的你是和镜外的你面对面的，两者的前后是反着的。因此，如果你以这个前后颠倒的人为基准命名他的左右手，那么你命名的左右就是错误的！这就是“左右”的文字游戏。很抱歉让你挨了一巴掌才告诉你真相，那么假设现在你又被旁人扇了一巴掌，扇到原地转圈，请注意看：你是顺时针转动的，而镜子里的你呢？恰好相反。别急，不是说镜子里的转动都是反的，拿别的什么东西转一转，让转轴垂直于镜子。看，这次镜子里的旋转与外面的相同。也许你又会说了，镜子里的旋转分明是相反的。我再强调一次，顺逆时针也是一个文字游戏，别忘了在镜子里前后是反的，因此定义顺逆的时候站的角度也不对，你还是要从你的视角来看。要更严密地用数学解释这些问题，你可以查一下这几个关键词：“极矢量”“轴矢量”。



17 为什么烤火炉时不用涂防晒霜呢？

首先我们要知道皮肤被晒黑的原因：当皮肤受到紫外线的刺激时，黑色素细胞中的酪氨酸酶被激活，促进了黑色素（可以对皮肤进行一定的保护）的生成，皮肤自然就变黑了。其中的关键因素是太阳光中的紫外线（UVA、UVB等），因此防晒霜是通过反射、散射或者吸收紫外线来达到不让皮肤晒黑的目的的。但是日常生活中的火焰或是取暖器，其中的紫外波段的辐射几乎没有，它主要是通过红外线辐射的方式把热能传递出去，使我们感受到温暖的。所以烤火时大可不必涂防晒霜，但要注意适当的保湿，以防止烤火过度导致皮肤干燥。



18 运动手环测心跳用的是什工作原理？

目前运动手环多数是通过测量反射光来监测心跳的，具体过程如下：手环将一束光打在皮肤上，当心脏泵血时，血管中充满血液。血液倾向于吸收绿光反射红光，因此心脏在收缩和舒张时会产生颜色不同的反射光，手环正是通过检测这些反射光来记录心率的。

可以看出想要有效使用手环监测心率需要正确佩戴才行，不能有漏光，还要保证佩戴处血流通畅。



19 为什么两个影子靠近时会相互吸引？怎么确定是谁吸引谁呢？

影子相互“吸引”的现象，主要是由半影效应导致的。大家生活中常见的光源，往往都不是理想的点光源，如太阳、烛火、日光灯等，都是具有一定大小的。因此，地面附近物体的影子，通常可分为两个区域：中心部分太阳光完全被遮挡，看起来最暗，称为本影；边缘附近，只挡到太阳光的一部分，形成模糊的明暗过渡区，称为半影。

从地球上看来，太阳视角略大于 0.5° ，从而离地1m的物体半影宽度接近1cm，肉眼明显可见。当两个物体相互靠近时，半影接近并重叠，重叠部分比普通半影更暗；越是靠近，其暗度越接近本影，从而看起来像是两个影子相互“吸引”并连接在一起的。至于“谁吸引谁”，依前述分析看，这个“吸引”效果是两者共同形成的，不存在谁主动谁被动的问题，要研究的话其实也可以，但是得先给吸引方向下个较为明确的定义。

此外，如果你用细长的日光灯做实验，还会发现平行和垂直于日光灯的两个方向上，影子吸引的程度也有所不同，这其实就是因为半影区域的大小与光源在相应方向上的尺寸有关。值得一提的是，由于眼睛对亮度的感知具有一定的非线性效应，我们会将中间半影重叠区的亮度进一步低估，从而增强这种“吸引”感。当然，这是另一个话题了。



20 地铁里检测液体的仪器运用了什么原理？

地铁里检测液体的仪器原理主要可以分为三种。

1. 拉曼光谱法。仪器发射单束激光到液体中，测量液体散射的光，利用其产生的化学指纹确定液体的成分。这种方法适合于透明液体的检测。

2. 荧光淬灭技术。利用了分子印迹荧光聚合物传感技术，正常状态下这些聚合物传感材料在紫外线下发出荧光，但是如果有炸药分子吸附到传感材料上面，荧光会迅速淬灭被仪器检测到，灵敏度很高。

3. GPR（Ground Penetrating Radar）探地雷达技术以及介电常数和电导率检测。已知介质对微波的吸收与介质的介电常数成正比，我们可以利用此特性，通过判断液体的介电常数判断其类别。

此外，对于一些金属容器还可以利用X射线方法等。



21 为什么有些厚玻璃从侧面看是墨绿色的呢？

玻璃之所以显绿色，是因为内部掺入了亚铁离子，不同价态的不同金属元素的掺杂也会产生不同的颜色，这和元素的光谱特征相关。

我们这里主要解决的是，为什么掺杂微量亚铁离子的玻璃，从正面看远不及从侧面看，表现出的墨绿色更明显。这就要介绍一下化学分析中常涉及的光吸收的基本定律：比尔-朗伯定律。当一束平行单色光垂直通过某一均匀非散射的吸光物质时，其吸光度与吸光物质浓度及厚度成正比。我们现在假设玻璃中主要掺杂成分就是亚铁离子，而玻璃本身是透明的，所以吸光物质主要就是微量杂质亚铁离子，那么很明显，厚度越大，吸光度越大，也就越发绿了！

电学篇

01 手指能滑动手机屏幕，有些东西却不能。什么样的材质才能滑动手机屏幕呢？为什么手机屏幕上有水滴时会发生触屏失灵的现象？

现在绝大多数智能手机屏幕采用的都是电容式触摸屏，当手指触摸在金属层上时，由于人体有电场，手指和触摸屏表面会形成一个耦合电容。对于高频电流来说，电容是直接导体，于是手指从接触点吸走一个很小的电流，这个电流分别从触摸屏的四角上的电极中流出，并且流经这四个电极的电流与手指到四角的距离成正比，控制器通过对这四个电流比例的精确计算，得出触摸点的位置。因此，只要利用的材质能和手机屏幕形成电容就行，如苹果皮、西瓜皮、香蕉皮等导体都能滑动手机屏幕。绝缘体如厚纸张、塑料、橡胶等是不行的。

此外，当手上沾了太多水时去触摸屏幕，由于屏幕上会产生太多感应位点，无法计算出准确的触碰位置，因此会产生触控漂移的现象，屏幕也就不灵敏了。

不过，随着技术的进步，防水手机已经上市，目前能带水操作的手机可以通过增强信号处理精度以及提高刷新频率来分辨手指和水滴形成的导电面的细微差别。这样，即使在水里也可以通过触屏操作手机了。



02 手机是如何测剩余电量的？

手机剩余电量已经成为我们出门前必须要检查的数据。那么手机是如何知道电池剩余了多少电量呢？其实在电池的內部有一个电量计，用于指示可充电电池中的剩余电量以及在特定工作条件下电池还能持续供电的时间。测量剩余电量主要有以下三种方法。

电压测试法：电池的电量是通过简单地监控电池的电压而得来的。这种方法相对来说比较简单，但是电池的电量 and 电压不是线性关系，所以这种测试方法并不精准。

电池建模法：这个方法是根据电池的放电曲线来建立一个数据表，数据表中会标明不同电压下的电量值，这一方法可以有效地提高测量的精度。但要获得一个精准的数据表并不简单，因为电压和电量的关系还涉及电池的温度、自放电、老化等因素。只有结合了众多的因素来进行修正才能够得出较满意的电量测量。

库仑计：库仑计是在电池的正极和负极串入一个电流检查电阻，当有电流流经电阻时就会产生 V_{sense} （可以理解成一种电压），通过检测 V_{sense} 就可以计算出流过电池的电流。因此可以精确地跟踪电池的电量变化，精度可以达到1%。另外， V_{sense} 通过配合电池电压和温度进行检测，就可以极大地减少电池老化等因素对测量结果的影响。iPhone 就是采用这一方法。



03 手机是怎样计算行走步数的？

现在的智能机普遍配备了加速度计、陀螺仪、指南针等传感器，这些传感器在手机发生移动的时候会收集数据传给手机上的操作系统进行分析。手机里边的加速度计是一个不断振动的微机械摆件，通过测量外界加速度对振动的影响来测量手机的加速度。操作系统拿到这些数据之后，会通过算法对传感器的数据进行识别，如人在走路或者跑步的时候，加速度计会测到一定范围内的周期信号，因为手机不是固定的，所以会有很多其他的移动造成的噪声信号。通过滤波算法去掉那些噪声信号之后，再分析信号的振幅和频率，手机会把一秒几次的信号当作走路的信号来计算所走的步数。一般手机都是从几个周期以后开始计数的，所以一般来说比实际的步数要少一些。

另外，手机加入磁传感器之后，手机的指南针功能也有大幅的提升，早期的智能机地图的指向几乎是瞎指，磁传感器是通过测量地磁场来进行方向识别的。虽然地磁场比较微弱，但是基于现在强大的传感器技术，手机上的磁传感器能够轻易测出地磁场的方向来确定方向，这要归功于霍尔效应的发现。手机在不同的方向上分别测量磁场强度，即可找到地磁场的指向，从而辨别方向。



04 为什么冬天的时候裤子上会带电，电荷是从哪里来的？

这不正是摩擦起电吗？还记得刚开始学电学的时候，我们就学过“用丝绸摩擦过的玻璃棒带的电荷是正电荷，用毛皮摩擦过的橡胶棒带的电荷是负电荷”。

至于电荷的来历，我们知道，物质都是由原子组成的，而原子内有带负电的电子和带正电的原子核。摩擦过程中发生电子转移，使一物质电子增多（带负电）而另一物质电子减少（带正电）。当积累的电荷比较多，突破临界电压时，物质就会出现放电现象。人类正是从摩擦起电开始来认识电现象的。裤子上带电，多半也是在穿或者脱裤子的时候，才会看到比较剧烈的放电现象，因为这个时候的摩擦最剧烈。

比较有趣的是摩擦是不分季节的，但为什么静电现象在冬天会比较常见呢？主要有两方面原因：一是冬天外套含有大量化纤成分，这些物品与毛制品摩擦更易起电；二是冬天空气干燥，而夏天空气湿润。湿润的空气会使衣服也相应湿些。湿润的空气和衣服利于电荷转移，电荷积累不到一定的数量，电压不够，是不会出现放电现象的。



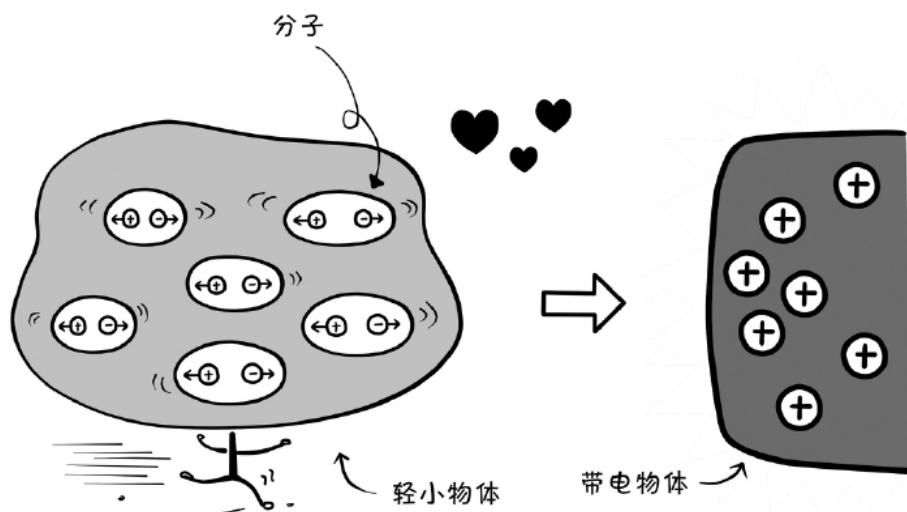
05 打火机上的电打火机运用了什么原理？

现在市场上的打火机主要采用压电材料接受较大压力产生大量电荷聚集然后放电来点燃燃气。当对压电材料施以物理压力时，材料体内的电偶极矩会因压缩而变短，此时压电材料为抵抗这个变化会在材料相对的表面上产生等量正负电荷，以保持原状。这种由于形变而产生电极化的现象称为“正压电效应”。优良的压电材料可以瞬间在两端聚集大量的电荷从而产生高压放电来点燃燃气，实现从弹性势能到电能的转换。



06 为什么带电物能吸引轻小物体？

生活中我们常会发现带电物体能够吸附轻小物体，这个过程利用了静电吸附的原理。很显然，如果轻小物体带有与带电物体相反的电荷，根据库仑定律，我们知道它们之间具有一定的吸引作用。但如果轻小物体不带电荷，它们之间的吸引力又是如何产生的呢？由于轻小物体的组成分子可能是极性分子和非极性分子，现对两种情况分别进行分析。对于极性分子，分子正负电荷中心不重合，在带电物体的电场作用下，同性相斥、异性相吸，极性分子呈现一定的取向，与带电物体电荷相反的一端远离带电物体，吸引力大于排斥力，表现为吸引作用。对于非极性分子，同性电荷受到电场的排斥作用，异性电荷受到电场的吸引作用，其正负电荷中心在电场的作用下分离，诱导出极性，根据和极性分子一样的分析，我们可以得到总的吸引相互作用。



07 高考的考场内是如何做到信号屏蔽的呢？

我们首先来看如何对手机信号进行屏蔽。一般来说，手机信号频段是相对固定的，而且都与附近的基站进行通信，那么要屏蔽手机信号，只要做到在手机的频段内发射比手机信号强得多的噪声信号，使手机无法与附近的基站进行通信（类比到声音上，就是相当于放一个特别吵的噪声源，两个人互相之间就听不清对方在说什么了），就可以实现对手机信号的屏蔽。实际上这也是战场上常用的电磁干扰的方式，在特定频段的干扰会导致依赖这一频段的无线通信电子设备失去战斗力。著名科幻小说作家刘慈欣曾经写过一部《全频带阻塞干扰》，里面就有类似的情形，如果大家感兴趣可以看一看。

除了手机，还有一些电子设备使用的频段比较特殊，针对这一情况，一般考场还会有来回巡视的信号检测器，可以检测到很宽频带上的信号，一旦检测到就会严加调查。



08 冬天时手机为什么更费电？

首先，我们来解析一下题目：冬天时手机真的会更费电吗？其实不然。我们所能说的只是充满电的手机在冬天可以使用的时间更短。出现这种情况并不一定是因为手机消耗了更多的电能，也有可能是因为电池无法提供足够多的电能。

事实是，冬天手机的运行并不比夏天费电，甚至更省电。冬天手机不耐用的原因是电池性能的下降。现在手机普遍使用锂电池，它通过化学反应产生电能。电池标称的容量一般是在25°C的环境下测得的。在低温情况下，电池内化学原料的反应变得不彻底，在极低温情况下，电池内甚至会结晶。所以尽管充电的时候储存了足够多的电能，但是在使用的时候并不能彻底地释放出来，这也就给人造成了冬天时手机更费电的错觉。另外，有些手机出于保护机器的目的会设置为在低温下自动关机。



09 打开小风扇，把扇叶捏住让它不要转，那么它还会继续耗电吗？

小时候我喜欢玩四驱车，每次我让车跑之前都会先打开开关，然后把车按在地上让它不动，接着松手，走你。结果是我的四驱车往往没玩几天就跑不起来了，换电池也没有用，拿去商店找老板修理，老板说它的马达烧了……

风扇叶的马达、四驱车的马达都是电动机，电动机是把电能转换成机械能的一种设备。电动机的原理是通电线圈产生旋转磁场并作用于转子，形成磁电力旋转扭矩。从能量的角度来考虑，接在电动机上的电源提供的电能大多数都被转换成了机械能，而当电动机被卡住无法转动时，这些电能就无法转换成机械能，而全部转换成了热能，因此电动机温度就会过高。所以捏住扇叶不让风扇转不仅不会节省电能，还会让电动机被烧坏。

从电磁学的角度来分析，线圈在转动时会产生一个感应电动势，其方向与电源的电压方向相反，因此施加在导体线圈上的电压较小，产生的热能就少。当线圈停止转动后，施加的电压就是电源电压，因此通过线圈的电流会大幅增多，产生更多的热量，进而烧坏电动机。

电动机都会有散热设计，在正常工作时很难被烧坏，一旦发现卡住不转了就要立刻切断电源。



10 油罐车后面那条铁链有什么用？

在路上，我们会看到一辆油罐车后面拖着一条“尾巴”，有时是铁链，有时是看似橡胶的链子，它们的共同特点是都导电。加这条链子就是为了防止静电带来的危害。

我们知道在我们周围的环境中经常会产生静电，像油罐车这样各种部件以及与地面、空气之间经常摩擦的体系，静电的产生几乎不可避免。而静电积累到一定的程度就会形成电火花，电火花很可能会将油料点燃形成事故。而“尾巴”的存在可以将静电及时导走以避免危险的发生。



11 为什么远程输电要用交流电呢？

根据焦耳定律，当电流 I 通过电阻值为 R 的电阻时会产生热量，产生的热量为 $Q=I^2Rt$ 。即电流通过导体产生的热量跟电流的二次方成正比，跟导体的电阻值成正比，跟通电的时间成正比。

电线存在电阻，因此输电的时候就会发热损耗一部分能量，电线越长损耗的能量就越多。从公式来看，降低 R 或者降低 I 都可以减小 Q 。对于降低 R 来说就是选择合适的电线材质。

发电厂发出的电功率（ P ）是一定的，它取决于发电机组的发电能力，根据 $P=UI$ ，若提高输电线路中的电压 U ，那么线路中电流 I 一定会减小，因此能量损耗就小。早期制造高压直流电比较困难，而交流电在技术上要容易很多，因此就一直在发展高压交流输电。事实上，高压直流输电具有很多的优点，具有很好的发展前景。

12 交流电、直流电可以互相转化吗？如果可以，怎样转化？

先讲交流电转化为直流电，就是我们常说的整流器。整流器，其组成单元就是二极管（如稳压的PN结）和导线（这里我们不提及晶闸管整流器）。二极管有一个特性就是，沿着一个方向元件电阻很小，沿另一个方向电阻极大。整流器的基本原理就是利用二极管（正向电压导通，反向电压截止的原理）得到直流。整流电路分为半波整流、全波整流以及倍压整流等。这里就不一一赘述了，有兴趣的读者可以搜索相关资料。整流器在我们日常的家用电器中随处可见。

反之，将直流电转化为交流电的装置称为逆变器。既然电源是直流电，那么一个很简单的想法就是让电流有频率地正反向输出就能得到交流电啦，这也是逆变器的原理。生活中逆变器的应用有变频空调、电动汽车等。



13 食盐水导电到底是物理变化还是化学变化呢？

食盐水导电是化学变化。生活中常见的导体有两类，一类是电子导体，另一类是离子导体。电子导体是依靠电子移动来实现导电的，载流子包括电子和空穴，如金属、半导体等。离子导体是依靠离子迁移来实现导电的，包括电解质溶液（食盐水）、熔融电解质、固体电解质等。

把电源外电路的导线（包括电极）和食盐水作为研究对象，可以发现，它们同时包含了电子导电和离子导电过程，化学反应就发生在两者互相转化的界面上。电子传导至阴极时，无法单独进入水中传导，而是会和电场作用下迁移到阴极附近的氢离子结合，氢离子得到电子，变成氢气，发生的是还原反应，由电子导电变成离子导电。阳极同理，在电场作用下氯离子迁移到阳极，氯离子失去电子，发生氧化反应，生成氯气，而失去的电子进入阳极参与导电，由离子导电变为电子导电。

总之，离子导体和电子导体串联后，两类导体界面就必然有得电子和失电子的反应发生，即一定会发生电化学反应。这也带出了电化学的定义：研究电子导体和离子导体形成的带电界面现象及其上所发生的变化的科学。



14 金属探测仪的原理是什么？

金属探测仪利用了电磁感应的原理。当通有交变电流的线圈靠近金属物体时，线圈产生的变化磁场会使金属产生涡流，涡流又会产生磁场，反过来影响线圈的磁场，进而引发探测器发出蜂鸣声报警。

考场中使用的手持式金属探测仪只有一个线圈。一些用于其他场景的金属探测仪有两个线圈，分别是发射线圈和接收线圈。顾名思义，发射线圈的作用是产生变化的磁场，接收线圈则屏蔽了发射线圈的磁场而只接收金属中涡流产生的磁场。

从金属探测仪的原理中可以发现，只有导电性强的物质（如金属）才能被探测出来，并且金属探测仪无法分辨出金属类型及其形状大小，因此火车站和机场还会让大家的行李过安检传送带，这应用的是射线检测。

热学篇

01 为什么保温杯装热水后会变得很难打开？热胀冷缩，不应该更容易打开吗？

阻碍你拧开保温杯的是杯子和杯盖螺纹之间的摩擦力，这个摩擦力和螺纹表面的状态以及杯盖上的压力有关。把热水灌入保温杯之后，杯子确实发生了热膨胀，不过此时杯子内的压强近似于大气压。盖上盖子后，盖子就截断了杯子内的气体和大气的连通。慢慢地，杯子里的水温开始降低（无论多好的保温杯都不可能保持杯内水温一直不变），这时杯子里的气压就会慢慢变小，也就是小于大气压。所以盖子就会受到向下的净压力，这个额外的压力会增加杯子和杯盖螺纹之间的摩擦力，再加上净压力本身就会阻碍拧开杯子，所以保温杯就变得难以打开。



02 为什么保温杯装进烧开水，盖上盖子后摇晃一下，会有大量热气喷出来甚至顶开盖子？

开水倒入保温杯后，虽然杯中的空气会变热，但是还没有完全达到开水的温度。当你把盖子盖上摇晃之后，开水和杯中空气充分接触会把气体进一步加热，加热的空气体积膨胀。当你再一次打开杯子时就会有热气喷出甚至顶开盖子。其实就算是不摇晃只要放置一会儿依然会出现喷出气体的现象。如果你放置时间特别长，长到水都冷了，气体体积也会收缩，这时打开盖子会吸入气体。

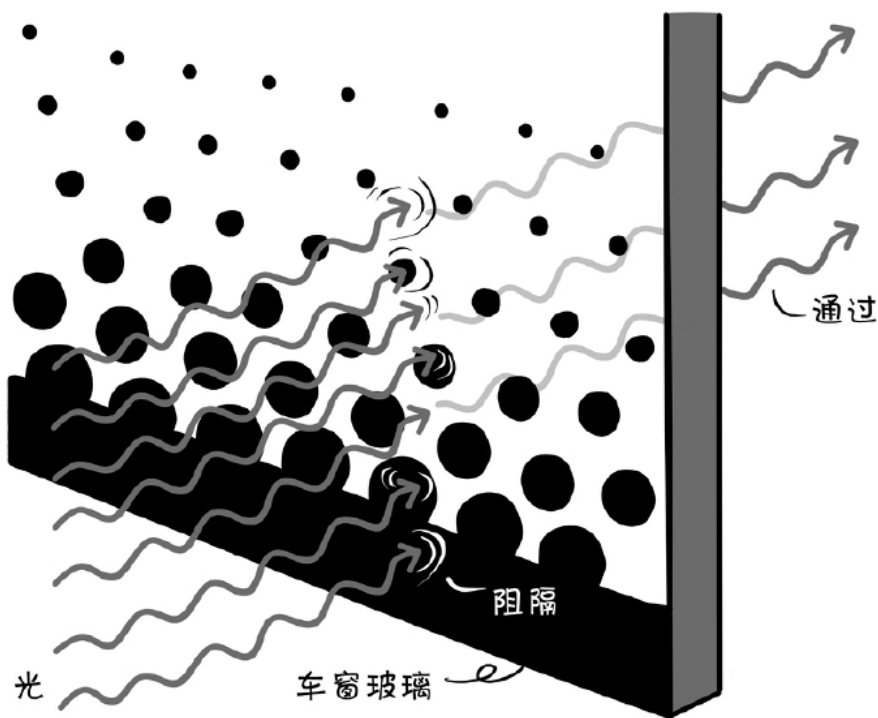


03 为什么暖气上方的白墙会被熏黑？

大家都见过，暖气片用久了以后会在墙面上形成一道道痕迹，这是为什么呢？因为暖气工作时会在周围产生热空气，热空气比冷空气轻，所以就会向上飘，热空气上升就会产生低压区，这需要附近的冷空气来填充。这个过程的整体效果是在室内产生了气流。气流会带动室内的灰尘，当灰尘和墙壁碰撞时就有可能吸附在墙壁上形成一道道痕迹。



04 车窗玻璃边缘为什么会有黑色的小圆点，有什么作用？



很多车窗边缘都有一些小黑点，而且越往里越小，直到消失。这些小黑圆点的作用是在夏季和冬季保护车窗玻璃不因温度变化而受损。因为车窗玻璃是用胶固定在汽车的金属框架上的，炎热的夏天车窗玻璃被暴晒后，车窗玻璃与金属边框接触的边缘部位也会随之升温 and 膨胀。但是，车窗玻璃中间的位置是透明的，有透光性，吸收的热量比周围边缘要少很多，所以中间部分的温度就比四周低，这就很容易让玻璃四周和中间部位的膨胀程度不同，给玻璃带来炸裂的隐患。夏天如此，反之冬天亦然。车窗边缘的小黑点就是用来解决这个问题的。

小黑点从边缘位置向中间逐渐变小，形成一个吸热能力的过渡，从而使热膨胀在一定距离上缓慢变化，保护车窗玻璃不会破裂。

05 空调是怎么吹出冷气的？

首先介绍两个生活中常见的现象：液体在汽化变成气体时体积会膨胀并吸收热量，如水蒸发；加压可以促使气体液化并释放热量，如液化气在钢瓶中通过高压液化。空调正是基于这两个现象的原理进行制冷的。空调的核心部件是压缩机，压缩机将内部的液体（比如氟利昂）运送到和室内空气接触的部位，液体吸热蒸发带走室内的热量。接下来，压缩机将蒸汽运送到室外的热交换机处并对其加压使它液化并释放热量，外机风扇会加速这些热量扩散到室外空气中，这也是空调外机吹出热风的原因。当压缩机完成液化和放热后，液体重新被送去吸收室内的热量，如此往复就能实现将室内热量搬运到室外的功能。

有读者可能会问：“热量不是不能从低温物体传导给高温物体吗？”事实上，热力学定律要求的是热量不能自发地从低温物体传递给高温物体，而在空调的例子中，压缩机需要一直对传热介质做功，所以整个过程并不是自发的，当然也不违背热力学定律。



06 为什么空调要分制冷和制热呢？如果冬天开制冷二十几度不也会暖和吗？

空调里边有压缩机与制冷剂，压缩机可以将制冷剂压缩成液体，这一过程是放热的，而制冷剂汽化是吸热的，制冷剂不断循环，从而使空调持续工作。制冷的时候是从室内吸热，把热量排放到室外，而制热的时候则是从室外吸热，将热量排放到室内，因此空调吹出的风总和排出去的风冷热相反。

空调的制冷和制热是两个方向相反的循环，也就是说只要是制冷，就一定从室内吸热而将热量排放到室外，因此制冷的温度设定再高也不会吹暖风，事实上如果设定的制冷温度比环境温度高时压缩机就停止工作了，即空调变成了风扇。

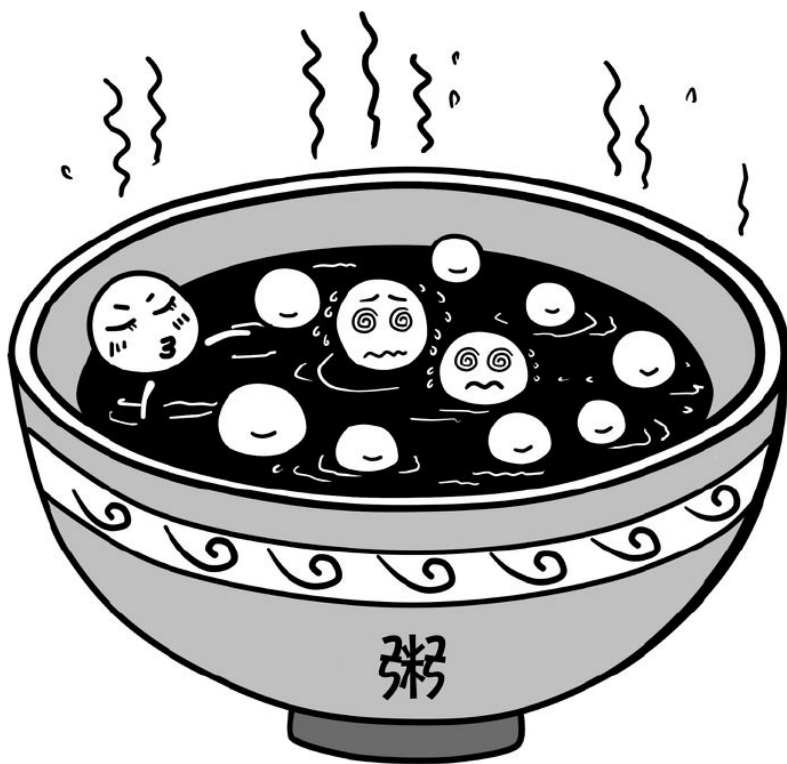
07 夏天车被暴晒后，如何快速降温？

铁的比热容比较小，约为 $460\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，水的比热容约为 $4200\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，即相同质量的铁和水在吸收同样多的热量时，若水的温度会升高 1°C ，铁的温度则会升高 9°C 。因此，在太阳下暴晒时车皮的温度很快就升高了，尤其是黑色的车。车皮的导热性很好，会把热量传递给车内的空气，因此车内的温度就比较高。我们觉得车内温度高，其实并不是因为车皮的温度高，而是车内的空气温度高。热传递的速率远没有空气流通的速率高，因此给车内有效降温的方法并不是降低车内空气的温度，而是将车内的高温空气排出去，让外界相对低温的空气进来即可。我们可以这样做：先打开车门让车内透气，如果着急的话就打开3个车窗，或开处于对角线的车窗，然后开动汽车，则车内的温度很快就下降了，此时再关闭窗户打开空调即可。



08 喝粥时从边缘喝起，不会太烫，但是中心温度很高，这是为什么呢？和水表面张力有什么联系吗？

这个问题涉及传热过程。传热主要有三种方式：对流、接触和热辐射。我们喝的粥，它的流动性比较差，所以我们可以忽略粥里的对流传热。另外，粥的表面会形成一层膜，我们也忽略掉蒸发的影响，热辐射就更不在考虑之中，剩下的就是接触传热。很明显，粥最终是向空气传热的（无论是否通过碗），边缘的粥直接和碗壁接触并直接向外界传热，效率比较高（温差大）。内部的粥只能直接向更外部的粥传热，这样的传热效率要低很多，因为温差很小。这么看，边缘的粥更容易变凉。如果我们对杯子里的热水进行分析，就会发现边缘的热水凉得快，但是并没有粥表现得那么明显。因为水的流动性比较好，对流传热让整杯水保持温度近似相同。





09 夏天的时候可以打开冰箱来给房间降温吗？

冰箱的制冷是通过制冷剂来完成的，压缩机先将制冷剂压缩，随后制冷剂膨胀吸热，降低冰箱内的温度，然后再被压缩，以此循环。制冷剂相当于把冰箱内的热量搬到了冰箱外边，而冰箱和空调不一样，冰箱全部处于室内，因此排到冰箱外的热量自然就释放到房间里了。压缩机工作也会产生热量，因此实际上冰箱排出来的热量要比吸收的多。所以打开冰箱门并不能给房间降温，反而会令房间升温。



10 自热火锅是怎么产生热量的？

自热火锅产生的能量本质上是化学反应产生的热量。暖宝宝中的物质主要是铁粉，打开密封包装以后，空气中的氧气与铁发生氧化还原反应，也就是铁生锈，慢慢放热。而吃火锅要来快的，就要用石灰粉（生石灰， CaO ），加水之后生成熟石灰 $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ ，这个放热更剧烈，可以快速加热食物。

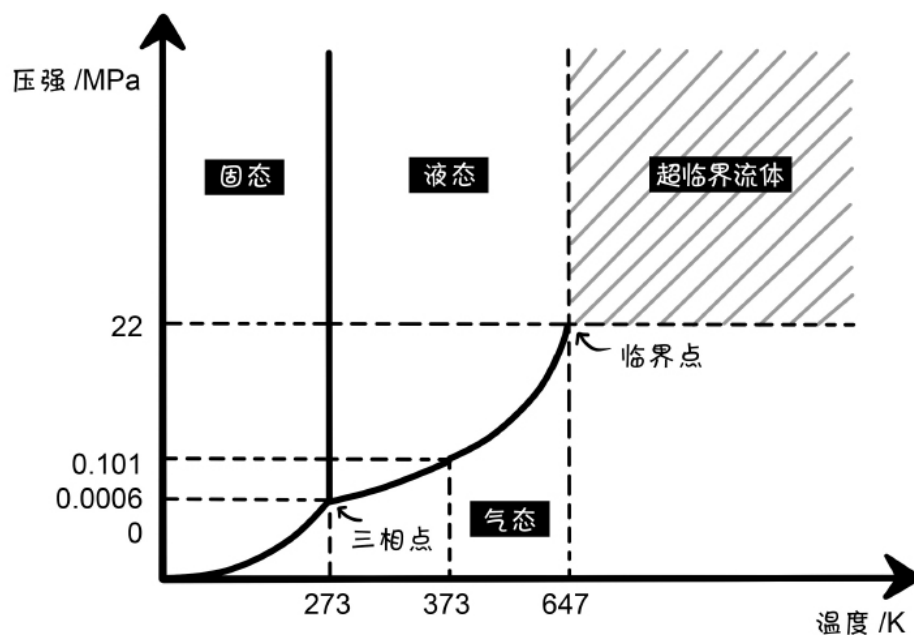


11 为什么泳池里的水总是有的地方二十五六度，有的地方十七八度？说好的热平衡呢？说好的无序运动呢？

平衡不是平均，只是一种稳定。如果泳池有加热源，靠近加热源的地方更热一些，热量不断从热源到高温水域再到低温水域再散失到空气中，所以温度永远是热源>高温水域>低温水域>空气，这样才能平衡。



12 水的沸点就是水的最高温度吗？



一般情况下，液态水最高的温度是沸点，因为水在沸点会发生相变变为气态，温度高于沸点时只能以气态存在。水的沸点并不是一成不变的，我们常说的水在 100°C 沸腾实际上是在标准的大气压的情况下。沸点是液体的饱和蒸气压与外界压强相等时的温度，因此在海拔高的地方气压低，水不到 100°C 就沸腾了，而高压锅里的水则可以达到 100°C 以上。不断地加温加压，水会越过临界点变为超临界流体。此时水的状态既不同于气态，也不同于液态，它的密度比气体要大两个数量级，与液体相近，但黏度却比液体小，很容易扩散。

另外，水的沸腾需要一个条件，即需要水中有微小气泡或容器壁表面有微小气泡或是容器表面极其微小的裂纹中有空气，否则极易形成过热水。过热水就是在本该沸腾的温度却没有沸腾的水，此时水的温度可以高于沸点。不过，过热水对水的纯度要求极高，一般不容易形成。



13 摩擦是如何产生热量的？

摩擦，如双手摩擦，是一种做功的方式。 W （功）= F （力） $\times s$ （距离/位移），在力的方向下产生位移，完成做功。由热力学第一定律可知：能量既不会凭空产生也不会凭空消失，它只会从一个物体转移到另一个物体，或者从一种形式转化为另一种形式，而在转化或转移的过程中，能量总量保持不变，即能量守恒定律。放在这个具体例子中就是摩擦做的功转化为热量从系统中耗散出去，就是所说的摩擦产生热量。



14 我们说温度是分子运动产生的，如果把一个瓶子里的空气抽干，那么里面的温度是怎么样子的？

事实上，“温度是分子运动产生的”这个说法是不准确的。温度是一个统计意义上的物理量，表征一个系综的能量大小。它不只适用于原子分子系统，也适用于光子系统，也就是说一个由各种频率的电磁波组成的统计系综，也可以定义温度。因此，即使一个瓶子里的空气被完全抽干了，其内部也会有各种频率的电磁波。瓶子内壁通过辐射和吸收这些电磁波，与内部电磁波系综相互交换能量，最后达到热平衡状态，温度与瓶子内壁温度一致。



15 干冰扔到水里以后出现的大量白雾是怎么形成的？

干冰实际上就是固态的二氧化碳，由于干冰升华时需要吸收大量的热，大量热量的散失会造成局部的气温迅速下降，使得周围空气中的水汽凝结成小水滴。因此，我们看到的雾实际是空气中的水蒸气凝结成的小水滴，而非水中的。这个过程和夏天我们吃雪糕时看到的白烟是一样的。



16 为什么细菌不能通过低温杀死，却能通过高温杀死？

我们知道，生物是一个动态的热力学体系，它在进行着各种各样复杂的生化反应，而这些反应离不开各种各样的蛋白质参与。蛋白质的结构与功能是生物体正常发挥其机能的重要保障。从热力学角度来看，温度越高，分子的无规则热运动就越强，能量越高；温度越低，则能量越低。从稳定的角度来看，分子处于低能级时要比高能级时稳定。因此，当温度升高时，蛋白质的结构就会变得不稳定，进而失活，而低温并不会让蛋白质失活，事实上蛋白质的保存就是要放在低温状态下，如保存在 -80°C 的冰箱，或者保存在液氮中。

另外，当环境变得不适宜生存时，有些细菌可以形成芽孢，芽孢是细菌的休眠体，当条件变得适宜之后，这些细菌会再次复苏。所以通常来说低温并不能杀死细菌，但在特殊的情况下低温也是可以“杀死”细菌的：如果细菌内的水分很多，在快速冷冻时那些水还来不及排出，则结冰形成的冰晶可能会对细菌的细胞结构有一定的破坏作用，从而杀死细菌。

17 为什么气温回升，地上的雪都化了，堆起来的雪人却没化？

雪会化是因为它通过各种渠道吸收到了热量，热量的传递对于不同介质来说效率是不同的。雪的比热容是很高的，是水的一半，而水是比较热容最高的物质之一。因此，想让雪的温度升高到熔点还是需要很长时间的，所以雪本身就不是特别容易化的。

地上的雪会和地面之间进行热传递，通常地面的温度要比雪高，再加上雪比较薄，因此当气温回升或者太阳长时间照射后雪就会化掉。而对于堆积起来又高又厚的雪人来说，它的密度比天然的积雪要大，因此外部的雪开始化时内部仍能在很长时间内保持低温。事实上雪被挤压之后的绝热效果还是很不错的，因此才会有雪屋的存在。

另外，雪人在融化时是不均匀的，并不是由外而内一点点化掉的。当融化掉一部分之后，间隙被导热性很差的空气填充之后就会较长时间地维持这一状态。比如有些雪或者冰实际上并不是和地面直接接触的，它们之间存在一层薄薄的空气，这是因为雪与地面直接接触的时候热传递快，容易化，而融化掉一部分后空气进去了，空气的导热性差，因此化得慢。所以即便雪人从外表上看似乎没有化，但其内部其实已经不饱满了，有很多微小的空洞。



18 为什么在夏天水泥地比草地热？

这可以从热量的吸收和释放两个方面来考虑。绿色植物叶子中的色素主要是叶绿素和类胡萝卜素，吸收蓝紫光 and 红光，而绿光则被反射了。因此，相比于水泥地，草地吸收的太阳光要更少，相应获得的热量也少了。

另外，水泥地的比热容比较小，如C30混凝土在25℃下的比热容是970J/(kg·℃) [水的比热容大约是4200J/(kg·℃)]。在阳光的照射下，水泥地升温快，温度也高。而草有蒸腾作用，水分的蒸腾可带走大量的热，再加上草地下的泥土比较湿润，比热容比混凝土大，这样使得在同样的阳光照耀下，水泥地的温度比草地高，我们自然就感觉水泥地比草地热了。



19 过冷水为什么不会凝结？

水结冰，需要两个过程，一是冰核形成，二是冰晶生长。当然，这两个过程都需发生在温度低于熔点的时候。当水的温度低于熔点时，水并不会立即结冰，它还需要冰核。污染物和颗粒可以作为冰核，所以不太干净的水总是更容易结冰。在非常洁净的水中，便需要水分子自身形成冰核。由于水独特的热力学性质，在没有涨落的情况下（静置），没有水分子愿意率先“组队”当这个“出头鸟”，没有冰核，冰晶就不会生长，也就不会结冰了，因此，虽然温度很低，但不结冰，水处于过冷状态。



20 高压锅煮饭为什么快？

煮饭的本质是将食物跟热源进行热交换作用。在煮饭时，将水和食物混合加热，通过水导热到食物当中，将食物做“熟”。液体沸腾时其沸点是液体饱和蒸气压等于外界压强时的温度。在标准大气压下水的沸点是 100°C ，但是在高压锅中，由于人为制造了一个密闭的空间，使得锅内压强高于正常大气压，从而水的沸点可以超过 100°C ，因此，在水将食物加热到更高的温度时，煮饭的速度也就更快了。

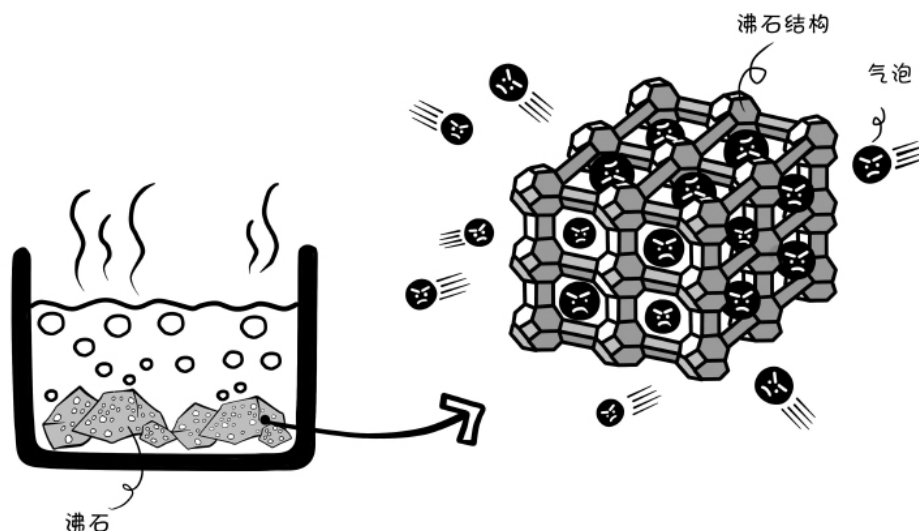


21 沸石是如何防止暴沸的？

像水结冰一样，水在沸腾的时候也需要核心：汽化核。

一般来说，水中的杂质和小气泡起着汽化核的作用。当温度高于沸点时，水会围绕汽化核进行汽化并形成气泡，这就是沸腾。当水中缺少汽化核时，即便水温超过沸点几十度，水也不会沸腾，这就是过热水。如果这时候突然引入了汽化核，由于现在温度已经超过了沸点，水会围绕汽化核剧烈沸腾造成水滴四溅并伴有爆裂声，这是非常危险的。

所以，不论是在实验中还是工业中都会采取措施来防止液体暴沸。加入沸石就是其中一种办法：沸石具有大量的孔状结构，这里面可以储存很多空气，在水中可以释放出大量的小气泡来充当沸腾的汽化核。所以，这样就可以保证当水温达到沸点时水就可以及时沸腾，避免产生过热水，也就不会产生暴沸了。



22 为什么夏天楼道里比外面凉快许多？

太阳光的成分除了可见光外还有红外线、紫外线，它们都可以传递能量，夏天的太阳光强烈，被太阳照会比平时觉得更热，同时，暴露在阳光下的地面会吸收部分太阳光，地表温度可达60℃以上，空气也会被加热，这便是太阳直射下觉得热的原因。

楼道里由于有墙的遮拦，阳光要弱许多，因此楼道里的空气、地面吸收的太阳光就少，故而温度比外边要低，干燥的空气导热性很差，所以阴凉处的空气能长时间维持相对低的温度，加上人也没有被太阳光照射，因此就觉得凉快。如果空气的湿度大的话，那么导热性就会上升，水的比热容很大，所以湿润的空气温度上去了不容易降下去。另外，如果空气湿度大的话，人身上的汗就不容易蒸发掉，汗的蒸发是人体散热的重要途径，故而在南方潮湿的城市阴凉的体验感要下降。

杂学篇

01 为什么洗洁精要把水和油融合在一起才能洗掉油渍？

油渍粘在衣物上后，会渗入织物纤维里，一般方法很难将油渍和纤维分离开。我们常用的办法就是用洗洁精去清洗被污染的衣物。不过油渍不仅可以用洗洁精加水清洗，也可以使用不含水的化学溶剂清洗，这就是干洗。但是归根到底，两种清洗方式的原理是相似的：干洗是用无水溶剂溶解污渍，并将污渍带走；水洗，虽然油渍不会直接溶于水，但是在洗洁精的帮助下，油渍就会进入水里，而水会将油渍带离衣物表面，这就达到了清洁的作用。

可以看出，两种办法都是通过令污渍脱离衣物然后用溶剂（化学溶剂或者水）把污渍运到衣物之外来清理污渍的。可以想象，如果没有水的帮助，即便使用了洗洁精，油渍也会依然留在衣服上无法清理掉。



02 橡皮擦铅笔字是怎样一个过程？

要理解这个问题，我们需先了解橡皮擦和铅笔芯的主要成分是什么。

古希腊罗马时期人们使用铅棒写字，14世纪开始出现类似现在的铅笔，目前市面上卖的铅笔的芯主要是石墨和黏土按一定比例混合制成的，分别用H和B来描述铅笔芯的硬度和石墨的含量，其中H前面的数字越大代表混合用的黏土越多，铅笔芯也就越硬。同理，B前面的数字越大写出来的字迹就越黑，同时铅笔芯也就越软。在石墨里边，碳原子呈层状排列，层与层之间非常容易滑移。铅笔芯里面的石墨颗粒在你写字的时候就粘在纸纤维上了。而橡皮擦的主要成分是橡胶，能够吸附粘在纸上的石墨。

但是天然的橡胶不容易掉屑，粘在上面的石墨把橡胶变黑再去擦字反而会越擦越脏。后来人们向橡胶里边加入硫等物质，这样在擦字的过程中，橡皮擦吸附石墨的部分就会团在一起变成碎屑掉下来，这就是现在的橡皮擦啦。裹着石墨的橡皮屑就将笔迹从纸张上带下来了。

03 一直很想知道，为什么只闭上左眼时感觉看到的景象向左移动了，而只闭上右眼时就感觉景象向右移动了呢？

我们生活的世界在空间上是三维的，所以当你看着前方的物体时，你不仅能看到它上下左右的位置，还能大概目测出它离你有多远。对距离的目测是动物进化途中一直拥有的技能，如果不能估计离前方的猎物、危险物有多远，我们的祖先早就灭绝了。

那么我们是怎么目测距离的呢？答案就是人有两只眼睛，这两只眼睛是从不同的角度去看物体的，所以成的像不一样。我们的大脑可以比较出这两幅图像的差异，对图像进行融合并让我们能够感知距离。所以我们两只眼睛看物体是交叉的，也就是左眼看到的偏右，而右眼看到的偏左。因此闭上右眼只用左眼观察时物体会偏右。

我们要爱护眼睛，一旦有一只眼睛不小心失明的话，就不能准确判断距离了。你可以试试闭着一只眼然后用手去触碰前方的小物体，你会发现你对距离把握得并不是很准了。如果不是对眼前的场景已经先入为主地熟悉了，你对距离的估计偏差会更大！



04 蒸熟的包子表面那层美味的皮是如何产生的？

日常生活中，吃包子和馒头的时候总会发现包子和馒头的表面有一层很美味的皮，吃起来有嚼劲，特香！那么这层皮是如何产生的呢？

我们首先来想一下馒头和包子发酵的过程，在包子和馒头刚刚揉制好时，酵母菌在有氧气的条件下迅速生长，快速繁殖，产生大量二氧化碳和水，当消耗了大部分氧气后，进行无氧发酵，产生二氧化碳和酒精。二氧化碳分布于馒头和包子的内部，使得馒头和包子的体积膨胀，在蒸制时进一步膨胀，形成内部疏松多孔的网络状结构。本来表面发生的过程也应该与内部一样，但是由于蒸的过程中表面在最外边，而且这个热的传导又是从外向里，所以表面一层会迅速失去水分变干，导致里边的气泡无法释放出来。但当二氧化碳气泡逐渐增大时，有时会撑破该气泡，释放出二氧化碳，并且由于表面没有面团的补充，撑破的面团在表面张力的作用下铺平，形成均匀的面层——表皮。



05 为什么心脏可以不休息地一直跳动？

虽然我们觉得心脏在一直跳动没有停歇，但其实心脏在每一个收缩周期中并不是一直处于工作状态的，而是既工作也休息。心脏每搏动一次的具体过程：先是两个心房收缩，此时两个心室舒张；接着两个心房舒张，随后两个心室收缩；然后全心舒张。

心脏一直以这种节奏在跳动着。如果心率是75次/min，则心脏每跳动一次所需的时间为0.8s（ $60\text{s}/75=0.8\text{s}$ ）。但心脏每搏动一次，心房、心室的舒张比收缩时间还要长一些，这样心肌就有充足的时间休息，并使血液充分流回心脏。这就是心脏可以一直跳动还不觉得累的秘密。

06 为什么食用油不能燃烧？

食用油可以燃烧。食用油不是不能燃烧，而是食用油本身着火所需温度相对于汽油要高很多，一般家庭中的烹饪过程中食用油燃烧的情况比较少，所以食用油看起来就是不可燃烧的。但在一些食堂的后厨食用油燃烧的情况就比较常见了。

只要能够达到食用油着火所需温度并且氧气充足，食用油就可以烧起来。在这里要提醒大家的是，油锅着火千万不要用水浇灭，正确的做法是盖上锅盖把火闷灭，或者加入大量青菜把火压灭。

如果用水灭火，由于水比油重而且燃烧的油温远远高于水的沸点，水会在油锅中剧烈沸腾，产生无数小油滴，小油滴和空气接触又充分剧烈燃烧，不但不会被灭掉，还会越着越大，极易发生危险。



07 为什么用钢笔在被水浸湿的纸上写字，写出的字会洇开？

纸的成分主要是植物纤维，相当于一个错综复杂的网状结构，因此钢笔水写在纸上会比较容易被吸附，而不至于扩散开来。但是钢笔水在水中很容易扩散，比如在一杯清水里滴一滴钢笔水，钢笔水很快就会扩散开来，整杯水都被染上了色。浸湿了的纸吸收了很多的水，水分子会填充到植物纤维之间，此时再用钢笔水写字，则钢笔水会溶解在水中，进而发生扩散，因此字就会洇开。



08 为什么气球碰到柠檬酸会爆？

橘子、柠檬、橙子、柚子等都属于柑橘类水果，其表皮富含柠檬酸、酯类等有机物，而气球是由高分子聚合材料构成的，柠檬酸等有机物如果接触乳胶等高分子材料，就会发生溶胀作用，气球的表层局部变得特别薄，因此容易被引爆。所以，在玩气球时不要吃柑橘类水果，以免发生不必要的危险。生活中还有一些常见的相似例子，如在加油时，都不会使用塑料桶，因为塑料的主要成分也是高分子聚合物，容易与汽油发生溶胀作用。



09 酒精是如何杀死细菌的？

酒精杀菌，其实是酒精破坏细菌的蛋白质结构（蛋白质变性），这些蛋白质可能用作结构蛋白（组成细菌细胞），也可能用作反应酶（进行细胞内的化学反应）等，被破坏蛋白质后的细菌无法进行正常的生理活动，就被杀死了。所以从这方面来看，酒精是可以杀死细菌的。

但是，医用酒精浓度一般在70%左右，为什么不选用更高的浓度呢？酒精破坏蛋白质结构后，蛋白质会凝固，如果高浓度酒精与细菌作用，会迅速在细菌外壳凝固蛋白质，阻止酒精的进一步渗入，杀菌效果会大打折扣。

酒精可以杀死细菌，对人体细胞有没有伤害？在消毒的时候，伤口周围的细胞是受到无差别打击的。但是，人体是一个有机的整体，不断进行血液循环，会对渗入的酒精稀释，并再生细胞，所以就最后的结果来看，没有产生大的影响。



10 烧开水为什么会有很多白粉末？

那是因为这些白粉末是以 CaCO_3 （碳酸钙）、 MgCO_3 （碳酸镁）、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ （氢氧化镁）等为主要成分的水垢。

一般来说，自然界中的河水、井水等直接烧开会出现这种情况。这是因为雨水有一定的弱酸性，降落之后与岩石等反应得到含钙离子、镁离子的化合物渗入地下水，经过自然力的长期作用后最终形成一些可溶于水的 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 、 $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ 等化合物。这种水直接烧开，就会分解成 CaCO_3 、 MgCO_3 等物质。若担心白色粉末影响饮用，则可将水静置一段时间或漂净后饮用。



11 为什么在车上玩手机会头晕？

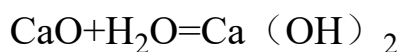
车辆在行驶过程中难免会有加速、减速、转弯，这些都会改变乘客的受力状态，车辆行驶中人需要调整身体姿势以和车的运动保持一致。这就加大了小脑、前庭感受器等负担。当人看着前方与窗外时，他能够对即将到来的转弯有一定的预判，因此大脑可以提前做好准备。而当人专心玩手机时，对外界的变化就没有预判与准备了，同时还得在各种摇摆中将注意力集中在“静止”的手机屏幕上，这样就更容易头晕了。



12 为什么干燥剂遇水会爆炸？

零食里面比较常见的干燥剂有两种，一种是生石灰，另一种是硅胶。

干燥剂遇水爆炸多指生石灰遇水爆炸。生石灰遇水会发生如下反应：



这个反应会放出大量的热，进而让水沸腾。如果将一定量的生石灰撒入装有水的密闭容器，那就会因为水剧烈沸腾而使得气压急剧增大，从而使容器炸裂。其实最危险的不是炸裂本身，而是溅出来的强碱性溶液，一旦溅到身上，就会腐蚀人体组织。

而那种透明的球状颗粒就是硅胶干燥剂，硅胶干燥剂很安全，但如果把它放入水中，也会发现透明的小球炸裂。这是因为硅胶多孔，吸水性强，浸入水中后体积急速膨胀，然后就炸裂了。

13 透明胶带在被撕开时可能有两种情况：撕得慢透明胶带就发白不透明；撕得快就是透明的。产生这两种情况的原因是什么？

这是个十分有趣的问题。先上结论，白色的其实都是小气泡。空气是透明的，气泡为啥有颜色呢？这是因为材料里面有很多气泡的时候，一束光射入以后并不能直接穿透，而是会在材料内部不断地发生吸收、反射、散射等过程，最终导致气泡看起来是白色的。比如我们平时吃的冰块，里面白白的东西就是小气泡和其他杂质。

胶带从20世纪初开始大量生产以来，已经有100多年的历史了。我们每个人从小到大都撕过不计其数的胶带，其中不乏一些十分有好奇心的科学家。胶带为什么可以粘住东西？其原因在于表面上覆盖有一层水性压敏胶，在和物体表面结合以后，可以降低表面的能量，从而牢牢地吸附在表面上。

胶带里面的小气泡是怎么来的呢？关于撕胶带的过程，科学家们有过很多研究，主要分为高速撕胶带和慢速撕胶带。高速撕胶带一般速度是10cm/s，科学家们研究的焦点一般在声音的来源和摩擦发光上（对，你没看错，撕胶带还会发光……）。

而慢速撕胶带一般有多慢呢？0.01mm/s，长度为1m的胶带要撕两个多小时。但是也只有这么慢的时候，我们才能看清在撕的时候胶带上发生了什么。

在显微镜下拍到的画面显示，慢速撕胶带时，附着在胶带上的胶水的形状变成了锯齿的样子。如果我们用不同大小的力去撕的话，锯齿的数量也会发生变化。当用力较小的时候，两个锯齿之间的间距比较大，也更容易撕出气泡来。而当我们快速地撕胶带时，锯齿会变得非常密，也就不会有气泡了。

14 为啥吃了薄荷糖之后张嘴呼吸嘴里会很凉呢？

这是典型的味觉欺骗效应，另一个相反效果的食物就是辣椒。之所以会出现这种效应，是因为这些食物里边含有的一些物质会与我们味蕾上相应的味觉感受器结合，然后向大脑传递错误的信号。

薄荷糖里边含有薄荷醇，会与嘴里的阳离子通道受体蛋白TRPM8结合，TRPM8在温度低的时候也会打开，让 Na^+ 和 Ca^{2+} 进入细胞，神经细胞再传递信号最终使大脑皮层产生“凉”的感觉，但是实际上薄荷醇并没有真正让嘴里温度下降。除了薄荷醇，还有桉油精等物质也有类似效果。同理，吃辣椒会觉得嘴里很热，原因是辣椒素会与TRP-V1结合，TRP-V1也是一种离子通道感受器，它在温度比较高的时候也会打开。所以，辣椒素也没有使嘴里真的变热。



15 一直困扰了多年的问题：掷硬币到底是不是随机的？如果我设计一台掷硬币的机器，每次它掷硬币的力度、接触面积、外界环境完全一致，那么每次硬币落下后的面是不是一样的呢？

掷硬币到底是不是完全随机，要看怎么去理解。原则上，掷硬币的整个过程都可以根据牛顿力学原理用确定的运动方程来刻画，所以只要我们给足了初始条件，如题中所说的掷硬币的力度、接触面积等，那么整个过程就是完全确定的，不存在任何随机性。然而，问题其实并没有这么简单，这些运动方程本质上具有很强的非线性，也就是说其对于初值非常敏感，初始状态的一点点微小的变化都会导致完全不一样的运动轨迹。因此从某种意义上来说，掷硬币的过程可以用蝴蝶效应来比喻。从这个角度来看，我们人类无法将所有的初始条件都精确控制起来，所以掷硬币的过程又是完全随机的。

16 为什么牛奶可以去除异味？是和活性炭的原理一样吗？还是里面的有机物和其他物质反应了？

牛奶去除异味与活性炭去除异味的原理肯定是不一样的。活性炭材料内多孔，比表面积大，其与空气充分接触并将大分子吸附在孔内，阻止其再次飘散到空气中，以达到去除异味作用。牛奶可没有这样的吸附结构。利用牛奶可有效去除的异味主要是蒜味，原因是牛奶中的蛋白质与大蒜气味分子发生反应。所以，爱吃大蒜又苦于大蒜气味的同学注意了，你可以在吃完大蒜后细细品味一杯牛奶，既健康又可以有效去除大蒜异味。



17 为什么航海船上的信号火炬可以在水下燃烧一段时间？就算有固体燃料或者镁、磷一类物质，但没有助燃剂啊？

信号火炬的使用环境特殊，要求它在燃放时火焰鲜艳、亮度大、火力强，那么仅靠空气中的氧气作为助燃剂是不够的，燃烧不够剧烈，需要在其中添加强氧化剂作为助燃剂，如高氯酸钾。虽然信号火炬在水下没有氧气，但是它的火药配方中有强氧化剂作为助燃剂，照样可以在水下燃烧。



18 流动的水比静止的水更难结冰吗？

流动的水的确比静止的水更难结冰。

水结冰其实是一种结晶的现象，结晶需要有凝结核，然后凝结核不断增大，最终变成大块晶体。从这里可以看出，结晶速率主要受到两个因素的影响，一个是成核速率；另一个是生长速率。首先，流动的水中，质点不容易聚集，成核困难；其次，受水流作用，水分子在凝结核表面难以长时间停留，晶体生长速率变缓。以上是从微观的动力学角度考虑的，从宏观上考虑，流动的水一般都是紊流，不是层流，因此水流下方温度比较高的水会到表层来，那么就需要带走更多热量才能让表层的水结冰，这也会使得流动的水更难结冰。



19 口香糖为什么不会粘住口腔？

回答这个问题我们需要从口香糖的成分入手，也就是天然树胶、甘油树脂等胶类物质加上糖浆、薄荷、甜味剂等。口香糖的黏性主要是大分子胶类物质（长分子链纠缠特性）的性质。而在口腔中，口香糖不粘的原因在于口腔中液体将口香糖和口腔壁隔离开了，也就是口香糖的有机成分不溶于水导致的，因此如果将口香糖泡在水里，用手接触，也不会觉得它很黏。



20 木柴燃烧时释放出的烟是什么？无烟煤为什么冒烟少？

这是因为，和木柴相比，无烟煤的炭化程度更深，挥发分含量更少。所谓挥发分，就是将煤在一定条件下隔绝空气加热，受热分解产生的可燃性气体（碳氢化合物、氢气、一氧化碳等）。因为木柴中含有比较多的氢和氧，含碳量比较低，燃烧时不断炭化，燃烧不完全，除了产生水蒸气、二氧化碳之外，还有一氧化碳、多环芳烃类、醛类等污染物，严重的还有未燃尽的碳粒，就是我们所说的“烟”。无烟煤碳含量高，燃烧比较完全，故产生的烟和可燃性气体少。



21 为什么纸燃烧的时候不冒烟，火灭了才冒烟？

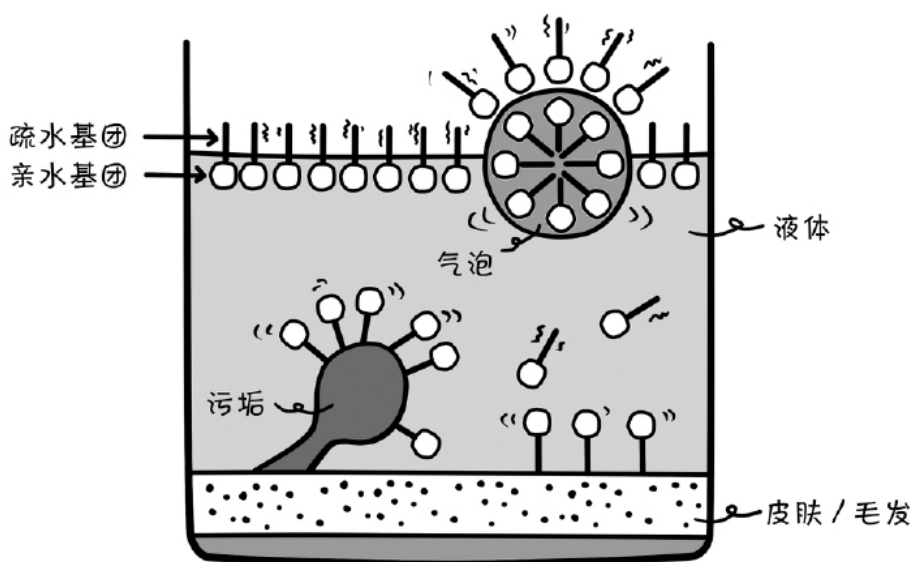
纸张的主要成分是植物纤维，一般情况下完全燃烧的产物是草木灰、水蒸气和二氧化碳。水蒸气和二氧化碳这些气体是无色无味看不到的。而燃烧快结束时（或者将火吹灭时），由于温度的下降，燃烧产生的水蒸气遇冷产生大量小水滴，裹挟着少量未完全燃烧的其他颗粒，形成白色烟雾。

水蒸气和二氧化碳气体确实是无色无味、不可见的。至于冬天呼气，以及舞台干冰所产生的白雾，均是水蒸气遇冷后形成小水滴后形成的。



22 为什么长时间不洗头，第一次打上洗发水搓不出很多泡沫？

首先讲一下泡沫产生的原因。洗发水中的主要成分是表面活性剂，表面活性剂的分子结构如下图所示，其头部是亲水基团，长长的尾部是疏水基团（亲油基团）。



纯水的表面张力比较大，不能形成稳定的气泡，因为气泡的产生会增大气液间的表面积，使得表面能增大，这是热力学不稳定造成的。加入表面活性剂后，表面活性剂的亲水基团插入水相，疏水基团竖在空气中，这样降低了表面张力，让气泡能稳定存在一段时间。第一次洗头时，因为头发上有很多污垢（有机物），这时候表面活性剂疏水基团会插入有机相，亲水基团插入水相，起到乳化有机物的作用，从而去除污垢。因为表面活性剂大部分去乳化有机物了，那么用于降低表面张力的就少了，自然泡沫就少了，从这个意义上来说，产生泡沫的多少可以用来表征你头发的干净程度。只要有泡沫产生，就说明你倒的洗发水是过量的，毕竟还有表面活性剂用来产生泡沫。最后还需要明确一点，表面活性剂产生泡沫的原因是它有降低表面张力的作用，而具有清洁作用的原因是它具有乳化作用，这两个特性不能

混淆，因为有的表面活性剂具有很强的去污能力，但是不怎么产生泡沫。



23 涂改液是怎样制作的？里面那个摇起来会响的东西是什么？

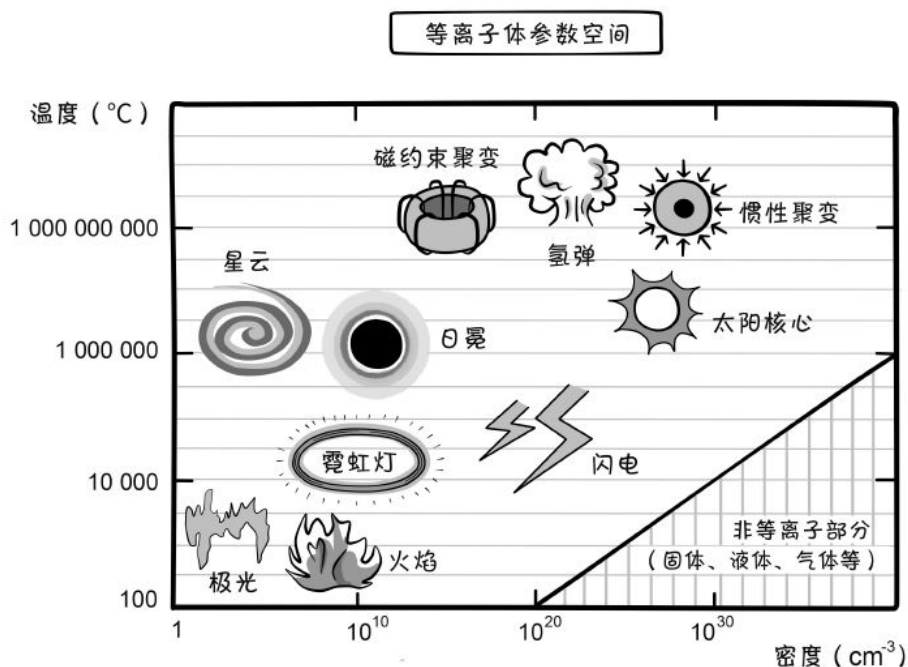
涂改液的主要成分是钛白粉，也就是 TiO_2 （二氧化钛）。涂改液的配方中含有甲基环己烷、钛白粉、环己烷、1, 1, 1-三氯乙烷、1, 1, 2-三氯乙烷、环己酮、甲基己丁基甲酮、二氯乙烷、树脂等化学物质。那个摇起来会响的东西是一个小钢珠，主要目的是将涂改液里面的附着剂（钛白粉）和溶剂（甲基环己烷）混合。在使用涂改液之前将其适当摇晃，挤出来的是溶质（钛白粉）、溶剂（甲基环己烷）和胶，溶剂在空气中挥发，胶将钛白粉粘在纸上，盖住原有的笔迹。



24 等离子体是不是只有在高温中才能出现（例如火焰的高温部分或闪电）？如果是这样，那等离子消毒也是一个高温的过程吗？

首先给出答案，等离子体并不只在高温中出现，等离子消毒是利用低温等离子体中的高温电子部分进行消毒的。

等离子体是物质存在的形态之一。通常认为等离子体是物质的第四态，等离子体就是显著电离的气体，但从气态过渡到等离子体，在热力学上没有物理量的突变，并不存在相变过程。这种说法并不准确。等离子体的准确定义应该是由自由电荷构成的、表现出集体行为的多粒子宏观系统。传统中性等离子体研究的温度范围非常广泛，可以从地球电离层（极光）的300K左右到白矮星磁化层的 10^{16}K 。温度和密度作为等离子体的两个参数，对应传统等离子体的参数空间如下图所示。



由于等离子体内部电子和离子质量相差较大，通过碰撞交换能量过程缓慢，各种带电粒子成分各自先达到热力学平衡状态，分别对应

电子温度 T_e 和离子温度 T_i 。当等离子体整体达到平衡状态时，具有统一的电子温度和离子温度，粒子间的碰撞势约为几个电子伏特，对应等离子体温度为几千度甚至更高，称为高温等离子体。还有一种状态是电子温度虽然很高，但体系中重离子温度很低，整体表现为低温状态，称为低温等离子体，由于体系处于非平衡状态也可称为非平衡等离子体。

低温等离子体消毒应用的就是这种原理：在几帕到几百帕的真空环境下利用特定电磁场对气体进行电离产生低温等离子体，电子温度可达 $20000\sim 30000^{\circ}\text{C}$ ，细菌的直径约为 10^{-6}m ，许多电子将细菌或病毒包围然后消灭，同时由于电子本身热容量较小，对宏观温度没有影响，不会对消毒的物品产生损伤。低温等离子体消毒的温度一般为室温。

随着激光冷却技术的发展，超冷等离子体成为研究热点，其温度可以低至 mK (10^{-3}K) 量级。1999年，美国国家标准与技术研究所的S.L.罗斯顿 (S.L.Rolston) 小组首次采用光电离激光冷却原子的方法，得到了电子和离子温度分别低到 0.1K 和 0.00001K ，密度高达 10^9cm^{-3} 的氦原子的超冷中性等离子体。



25 跳跳糖里有什么物质？

跳跳糖是一种口感独特的糖果，大部分人小时候都吃过。那么跳跳糖这种独特的口感是怎样形成的呢？

跳跳糖之所以拥有如此奇特的口感，是因为在糖果的内部密封有高压的二氧化碳，当口中含着跳跳糖时，唾液会将表面的糖逐渐溶解掉，这样气泡破裂二氧化碳就会跑出来而产生独特口感。

跳跳糖的制作方法已经不是什么秘密：在将所有的原料混合后，一起溶解在少量水中，然后将溶液放在密闭容器中加热到 150°C ，再充入二氧化碳，冷却后细微的二氧化碳气泡就包裹在跳跳糖中了。



26 为什么方便面是弯的而不是直的？

方便面并不是在加工过程中由直变弯的，而是一开始生产的时候就专门做弯了！面条首先需要被高温蒸汽蒸熟，然后经过油炸，因此方便面都比较脆。面变脆之后就容易折断，而在运输与储存期间难免会磕磕碰碰。因此当面条存在各种小的弯曲时就变得不容易折断，能承受更多的压力。

另外，桶装面是要装在纸碗里的，碗的口径是有限的，如果面条是直的，那么相同的面积所能放置的面条会比较短，而当面条弯曲之后虽然厚度变厚，但是相同的面积所放置的面条增多，可以充分地利用纸碗的空间。从成本方面考虑，将面条设计成小波浪的自来卷，比扩大纸碗的口径要低得多。

最后还有一个好处，如果面条是直的，那么面条之间就会堆积得比较紧密，泡面时水就不容易进去，而当面条弯曲之后，面条与面条之间就会有空隙，泡面时可以和热水充分接触，保证了泡面的口感。



27 为什么大部分跑道都是逆时针的？

有关跑步方向的最初规定起源于赛马运动。最初赛马运动的环形跑道并不是在体育场内，而是在人来车往的大街上。由于英国交通实行左侧通行规则，马唯有靠左跑和向左转弯才能避免与迎面而来的马车相撞。这种左侧通行的交通规则使得赛马沿逆时针方向跑成为惯例。

在1908年伦敦奥运会时，左手靠内侧（left hand inside）的规定被采纳，自此，逆时针田径赛道的规定沿用至今。同时，对于长期从事田径运动的人来说，长期沿一个时针方向的赛道跑步可能导致左右腿受力不均衡，可以定期更换赛道协调身体平衡。



28 水喝多了还会水中毒，所以水有毒性？

水中毒是指机体水的摄入量超过了排水量，以致水分在体内滞留，打破了水和电解质的平衡，引起血浆渗透压下降和循环血量增多，稀释了人体内的钠离子浓度的现象，在医学上又被称作稀释性低血钠。

钠是人体内很重要的电解质，有维持体内水分平衡、帮助神经肌肉运作的的作用。血液中的钠离子过低或过高，都会引起人体不适，而当人体血液中的钠离子浓度过低时，就会出现以下症状。

钠离子浓度低于130mEq/L：开始出现轻度的疲劳感。

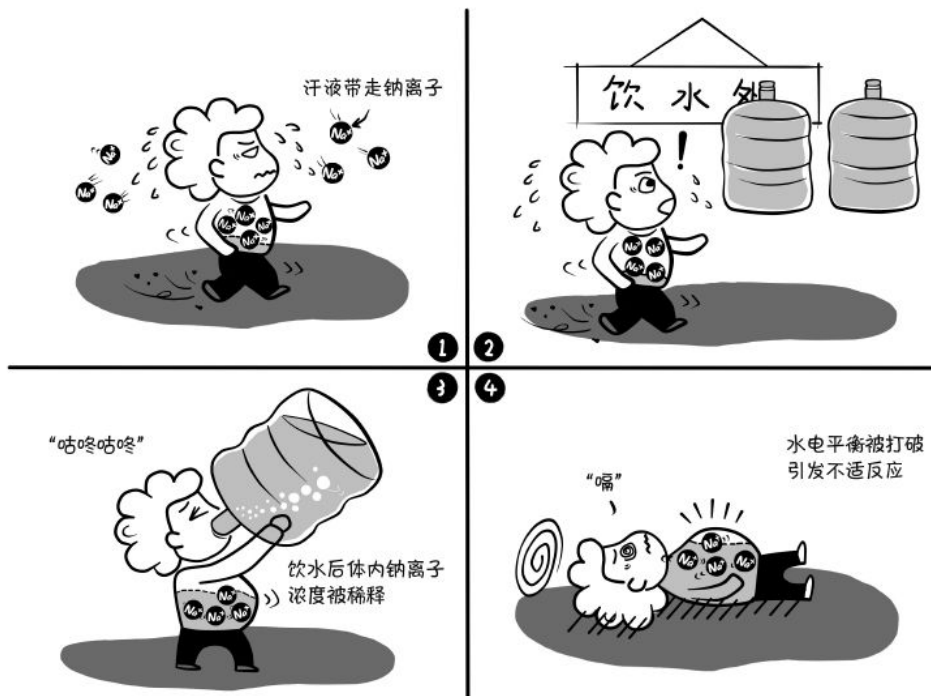
钠离子浓度低于120mEq/L：开始出现头痛、呕吐或其他精神症状。

钠离子浓度低于110mEq/L：除了性格变化，还伴随痉挛、昏睡的症状。

钠离子浓度低于100mEq/L：神经信号的传送受到影响，导致呼吸困难，甚至还可能导致死亡。

（毫当量浓度为毫摩尔浓度乘以离子价态数：对于钠离子有1mEq/L=1mmol/L×1价）

水中毒的原因主要有：在大量出汗后马上大量补充水分、急慢性肾功能不全、药物影响等。一般情况下，只要不是短时间内大量喝水，我们的肾脏是可以调节的。因此，正常饮水不用担心水中毒情况的发生。



29 可乐遇到牛奶出现沉淀是什么原理？和牛奶里加食用盐，盐析蛋白质是一个原理吗？

牛奶中80%的蛋白质是酪蛋白，酪蛋白在pH低于4.6时会沉淀。因为可乐配料中含有磷酸，其pH为2.5左右，所以可乐和牛奶混合会使酪蛋白沉淀。这和牛奶里加食用盐，使蛋白质析出不是一个原理。

对盐析现象的解释要用到胶体的概念。牛奶中含有大量蛋白质颗粒，是一种胶体，其中的酪蛋白颗粒带负电。胶体之所以能维持稳定，是因为同种胶体粒子所带电荷相同，有静电排斥力，胶体粒子不易聚集；并且胶体粒子表面的溶剂化层相当于胶体粒子的“保护伞”，胶体粒子相互靠近时，“保护伞”因挤压而变形，产生的弹力会使胶体粒子相互远离。但是向胶体中加入大量无机盐时，会吸引大量水分子与这些无机盐离子水合，破坏了胶体离子表面的溶剂化层，并且无机盐离子会和胶体粒子所带的电荷中和，在这两种因素的影响下，胶体就会聚沉，这就是盐析现象。从上面的分析可以看出，盐析并不会改变蛋白质的空间结构，蛋白质重新溶解后仍然具有活性，所以盐析可以用来提纯蛋白质。

多说一句，盐析和铜盐聚乳是不一样的，铜离子是重金属离子，可以和蛋白质形成化学键，这样就破坏了蛋白质原有的结构，使蛋白质变性，这一过程是不可逆的。



30 为什么湿手碰洗衣粉会感觉到轻微的灼烧感？

洗衣粉是一种合成洗涤剂，主要成分是以烷基苯磺酸钠为主的表面活性剂，再混合一些助剂。同时，洗衣粉是碱性的，无论是以前加入三聚磷酸钠作助剂，还是现在利用4A沸石和碱性试剂作助剂（三聚磷酸钠被禁用主要和磷酸盐导致的藻类富营养化有关），主要都是为了增强表面活性剂的效应。常用的碱性助剂有纯碱和水玻璃。而纯碱，即碳酸钠溶于水会放热。另外，碱性较高的话，也是会使接触的皮肤有刺痛等感觉的。



31 现在有没有有一种技术能使石墨在特殊情况下反应变成金刚石呢？

石墨看起来黑不溜秋，金刚石看起来晶莹剔透，尽管它们颜色非常不同，但是组成它们的元素都是碳。它们的不同在于内部的原子组合方式不同，石墨是一层一层的，每层石墨只有一层原子，原子之间靠共价键链接，层与层之间是范德瓦耳斯力，单层的石墨又称为石墨烯，是最著名的二维材料。金刚石内部的原子全部靠共价键链接。虽然金刚石很硬而石墨很软，但是石墨要比金刚石更加稳定。有多种方法可以制造金刚石，它们分别需要不同的条件。

1. 直接法：利用高温高压直接将石墨等原料变成金刚石。
2. 熔媒法：利用高温（1100~3000℃）和高压（5~10GPa，1GPa相当于10000个大气压）使石墨等碳质原料和某些金属（合金）反应生成金刚石。
3. 外延法：利用热解和电解某些含碳物质时析出的碳源在金刚石晶种或某些起基底作用的物质上进行外延生长而成。
4. 武兹反应法：用四氯化碳和钠通过加温到700℃反应，生成金刚石。



32 臭氧为什么能污染环境呢？

臭氧（ O_3 ），氧气的同素异形体，是一种有着特殊气味的淡蓝色气体。臭氧主要分布在地球周围10~50km的高空中，保护地球不被紫外线过度照射。雷雨过后，我们都能在空气中闻到一股略微怪异的味道，就是我们常说的臭氧。

首先，在平时的空气中，臭氧是无毒的，只有较长时间处于较高浓度的臭氧环境中时，它才会对人体产生危害，也就是我们常说的，剂量决定毒性，就像水喝多了也可能中毒一样。其次，一般情况下，我们闻不到臭氧，是因为臭氧存在10~30min的半衰期，会分解为氧气。

我们常说的光化学烟雾主要成分就是臭氧，由 NO_x 、VOC（挥发性有机物）等转化而成。产生的臭氧具有氧化性，在一定的浓度下，会对材料造成腐蚀，如氧化聚合物材料中的不饱和键；影响植物生长，如破坏细胞膜，影响生理功能；对人体造成危害，如危害呼吸道和中枢神经。



33 为什么高铁过隧道时人的耳压会升高？

这不是耳朵内部压力变化，而是高铁进入隧道时气压的突然改变导致的。高铁通过隧道时，由于隧道内空气流动空间受隧道壁和列车壁的限制以及空气的可压缩性，从而使隧道内空气压力急剧变化，而高铁本身又不是完全密封的，内外部气压会发生平衡，从而使车厢内出现压力波动。而高速行驶的高铁产生的压力波动会被耳膜接收到，从而引起乘客耳鸣、恶心等不适症状。

好奇的读者肯定会问：“那么气压是增大还是减小呢？”这个问题其实要考虑车厢内外压力波的耦合，以及车厢密封性、车速、车身长度等因素，利用一维流动模型进行解决。这里仅将数值模拟的结果给出：高铁进入隧道引起的车厢内压力变化应该是先增大后减小，当然车厢密封性越好，受到的外部气压影响就越小。

34 为什么在灶膛里烧柴火，烟不会朝人的方向飘而是自动往灶膛里面飘然后从烟囱排出？

生活中，我们常常会发现一些有趣的现象，在灶膛里烧柴火，烟会自动往灶膛里面飘然后从烟囱排出，这是为什么呢？为了弄清楚这个问题，我们要对烟囱的形状有个直观的认识。一般而言，烟囱是一个两端开口的管道，烟囱一端连接灶膛，另一端的出口一般在房顶或房子的侧面，细心观察不难发现，烟囱出口的高度是高于灶膛的。

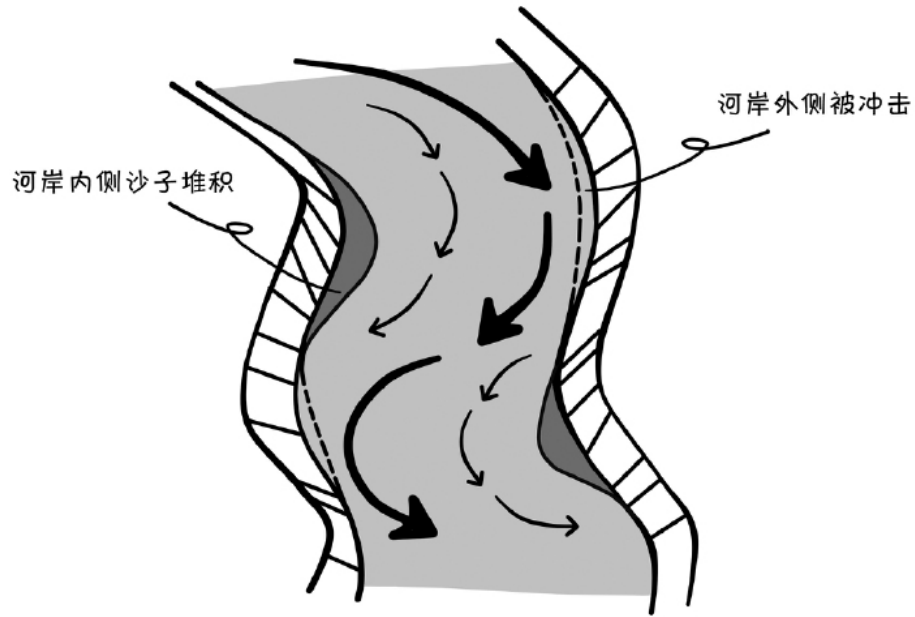
烟囱在此过程中主要防止气体在水平方向上扩散，起到封闭管道的作用，当热空气在烟囱里面上升时，会造成局部地区的低压，使空气持续不断地沿着烟囱上升。当空气在烟囱顶部离开时，由于热空气散溢造成气流，将炉外空气抽入填补，使炉火燃烧更烈。还有个有意思的现象是在下雨时烧火做饭，烟常常会从灶门灌入室内，这是因为下雨前，高空气压变大，使得烟从烟囱出口排出变得困难。

自然现象篇

01 为什么河流总是弯的？

原本笔直的河流可能因为各种各样的因素出现轻微的弯曲，而自然界中最不缺的就是这些偶然的扰动，以及扰动产生效果所需要的漫长时间。

扰动有很多，如地形的起伏，地层的裂隙、节理、断层，小动物在河岸打洞，都会使得一边的土壤变得松软，进而坍塌，使得水向那边靠近。而弯曲一旦产生之后就会变得越来越弯：如果河岸有小弯曲，那么水从那边流过时走的路线就是曲线，此时就会产生离心力冲击河岸，离心力的大小和弯曲的曲率、水流速的平方成正比，而最初产生的小弯曲其曲率很大，因此离心力大，会对河岸产生强烈的冲击，使得河岸进一步弯曲，变得更加偏离直线。水流在经过弯曲的河岸之后会像被反弹一样冲击到斜对岸的河岸，这一冲击会产生下一个弯曲，周而复始，因此河流往往是“S”形的。也就是说河流的弯曲分两步，第一步是原始的因素使得河流产生小的弯曲，第二步则是在离心力的作用下弯曲扩大，以及河水“反弹”对斜对岸的冲击形成下一个弯曲。



最后再说一下地球自转偏向力的作用，地球自转偏向力是对整段河流都起作用的，它并不会使河流形成差速水流，地球自转偏向力对于河流的作用是使得河道两岸受到的冲刷和堆积不同，与河流的弯曲没有关系。



02 为什么浪花看起来是白色的，而不是和海水一样的颜色？

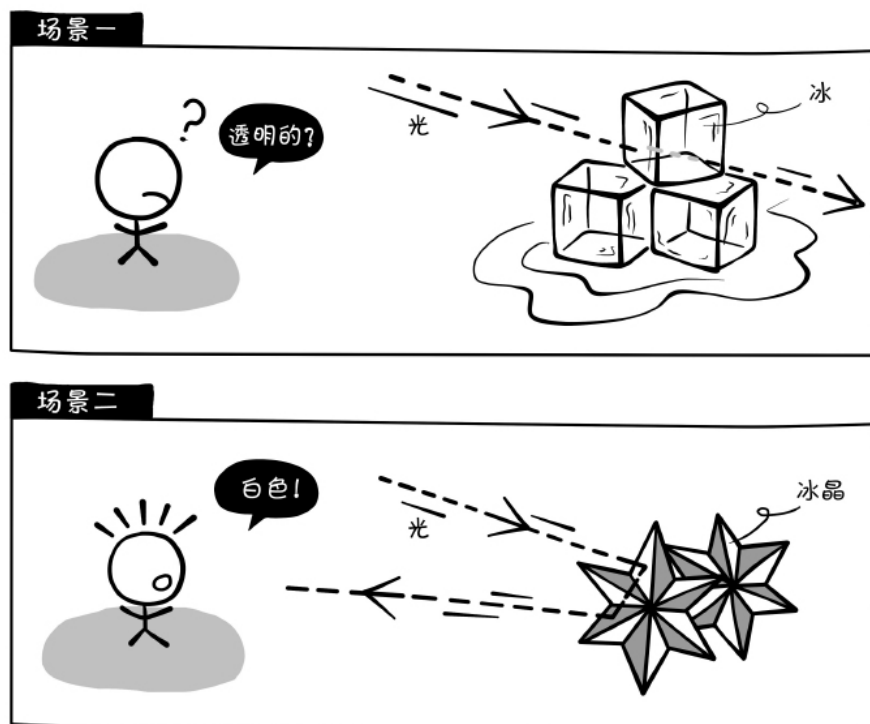
纯水是无色透明的，也就是说光线可以按一定规则透过水传播，其出射光线能反映出入射光线的信息。海水的颜色之所以是蓝色，是因为海水中含有一定量呈现出蓝色的杂质离子，并且保持了海水的透明度。

但为啥浪花呈现出白色呢？这是因为浪花并不是单纯的海水，而是海水和泡沫的混合物，这些泡沫就是一层水膜包着空气，这样在浪花中就存在了“海水—空气”的复杂界面。光线在其中传播时被无规则反射和折射，最终出射的光线不再含有入射光线的信息，因此不再透明。而这种无规则的反射和折射对各种颜色的光又是等概率的，所以最终我们看到的浪花呈现出白色的样子。相同的原理可以说明另外一个现象：比较完美的冰块是透明的，而含有大量裂纹的冰块却呈现白色不透明状。



03 同样是由水分子构成的，为什么雪是白色的，而冰是透明的？

一束光进入物体时，它会发生吸收、反射、散射等。而物质之所以有不同的颜色，是因为它对不同频率的光进行选择吸收并将呈现出来的颜色反射到我们的眼睛中。举个例子，绿植会呈现绿色是由于它不吸收绿色光（或者说吸收少）并将绿色反射回来。因此，冰是透明的在于它几乎不吸收可见光也不会把光反射回来，从而看起来就是透明的。但是同样是由水分子构成的雪为什么是白色的呢？这是因为雪花是由各种随机取向的冰晶构成的，而各种冰晶之间就会存在晶界，光在这些界面上就会发生散射，使得最终返回我们眼睛中的光是各种频率的光等概率的叠加，因此看到的雪就是白色的。事实上，若是用力敲击一块透明的冰，则我们也能看到白色的裂纹。



04 为什么冰块只有一小部分在海面上，大部分在海面下？

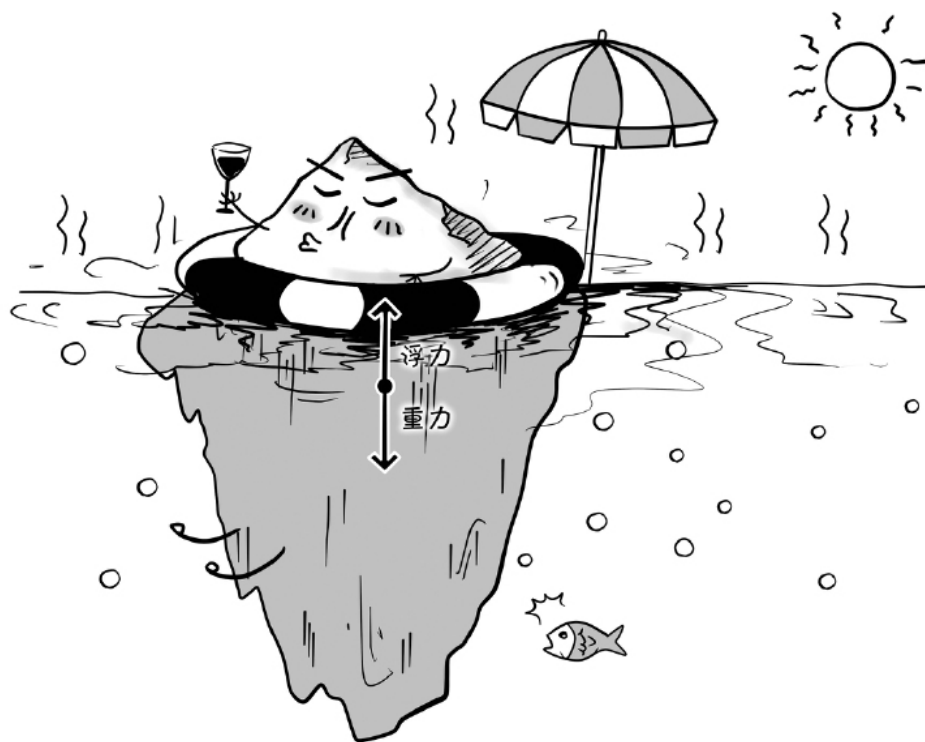
这与冰和水的密度有关，我们首先考虑两种极端情况。假设冰和水的密度相同，那么当冰块全部没入水下时冰所受的浮力与重力平衡，这种情况下，冰会全部隐藏在液面以下；由于冰的密度比水小，因此会漂浮在水面上；如果冰的密度为零，那么冰就会完全浮在水面上了。

下面对冰浮在水面上的情况进行计算，假设冰在水面下的体积是 V_1 ，冰的总体积为 V_0 ，冰和水的密度分别为 $\rho_{\text{冰}}$ 和 $\rho_{\text{水}}$ ，有：

$$F_{\text{浮}} = \rho_{\text{水}} g V_1 = mg = \rho_{\text{冰}} g V_0$$

$$\frac{V_1}{V_0} = \frac{\rho_{\text{冰}}}{\rho_{\text{水}}} \approx 90\%$$

一般情况下，冰的密度是水密度的9/10，因此冰块隐藏在水下的体积大约是总体积的90%，这就是冰山一角的物理原因。



◆◆◆

05 出现鬼火是什么原因？

首先需要说明的是，这种现象虽然叫作“鬼火”，但和“鬼”没有任何关系。之所以会被称为鬼火，是因为这种现象多发生在农村的坟地里，而且通常会跟随着人一起运动，看起来十分诡异。因此，在自然科学知识匮乏的古代，人们自然而然将之与鬼神联系到了一起。实际上这只是一磷化物气体在空气中自燃的现象。人体骨骼中富含磷元素，土葬的尸体在腐烂过程中，磷会与周围物质发生反应产生磷化物气体（主要为 P_2H_4 ），这种气体会从地下渗透出来飘向空气中。磷化物气体燃点低，在炎热的夏天很容易自燃，发出绿色磷光。这种现象在夏天正午更易发生，不过在日光下不易被察觉。

那为什么它会跟随着人一起运动呢？磷化氢气体较轻，容易随着气流飘动。人在自燃的磷化氢气体附近走动，会产生气压差（人带动空气流动，流动快的空气会比流动慢的空气气压低），使“鬼火”跟随人运动。

更有趣的是，在希腊文中磷同“鬼火”是同一个词。是不是当初发现磷的“炼金术士”就以“鬼火”来命名的这种物质呢？这就不得而知了。



06 雾和霾怎么区分？

我们知道，雾是可见的，因此它不是气态。事实上，雾是空气中凝结的小水珠。在春季的早晨，接近地面的地方，水蒸气遇冷，凝结在一起，变成了小水珠。而霾则不同，就物态来说，霾是一种气溶胶（一种悬浮在气体介质中的固态或液态颗粒所组成的气态分散系统），由空气中的灰尘、硫酸、硝酸等颗粒物组成，能使空气的能见度降低。从霾的组成成分上来看，我们可以大体推断出霾的由来，即由大规模城市建设、工厂排放废弃污染物等造成的。这些颗粒物被称为细颗粒物（PM2.5），即直径为 $2.5\mu\text{m}$ 及以下的悬浮颗粒，是造成雾霾的主要元凶。霾对身体的危害现在还没有显现出来，但是抬头不见蓝天、手机上显示的雾霾橙色预警，总是让人感到不安。雾霾问题，已然不容忽视。



07 为啥同样是乌云密布，有时候打雷有时却不打呢？

打雷是由于雷雨云中正电荷区和负电荷区之间的电场大到一定程度时，两种电荷要发生中和，从而击穿空气进行放电。此时会发射出强烈的光，产生闪电。电极化的通路上会产生高温，使四周空气因剧烈受热而突然膨胀，云滴也会因高温而突然汽化膨胀，发出巨大的响声，这就是雷鸣。同理，当带电云层运动时，地面相对应的地方会产生感应电荷，若云层与地面或地面高大物体间距离较小，则云层与地物间的空气会被击穿产生雷电。

通常，大气是不导电的。打雷需要云层之间的距离足够近，此时云层携带的电荷量形成的电场强到足以击穿空气。而大气的击穿阈值与空气湿度还有关系，湿度越高越容易被击穿，这就是为什么夏季更易打雷的原因。有时会出现只闪电不打雷的现象，这是由于闪电传播的距离比雷声远，等雷声传到我们这里时已经听不到了。

所以，打雷光有乌云是不够的，还需要云层距离足够近、电荷量足够大、空气足够湿才行。



08 云朵重吗？如何测量一朵云的重量？

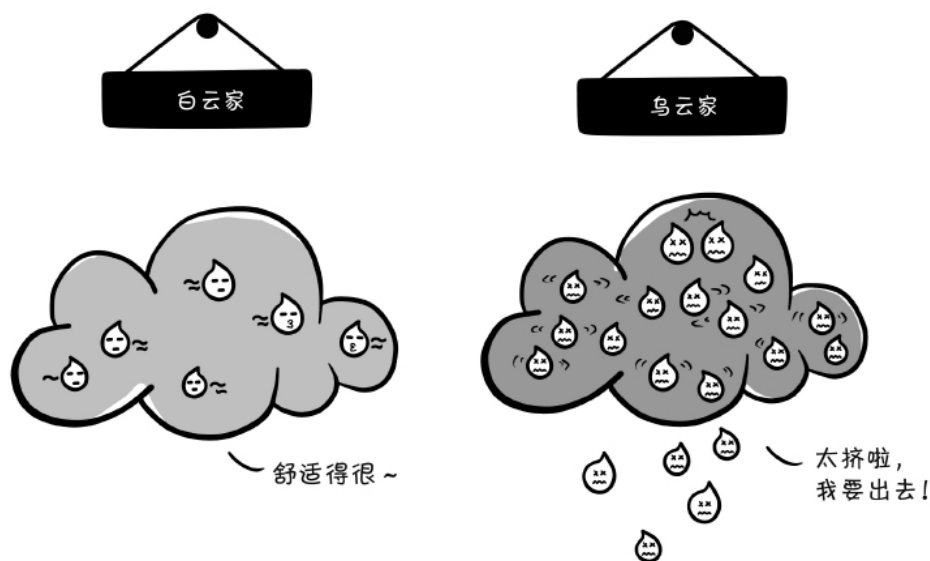
云一般是指大气层中包含其他多种较少量化学物质构成的可见液滴或冰晶集合体，这样悬浮的颗粒物也被称作气溶胶。讨论云的质量实际就是讨论形成云的气溶胶的质量。由于气溶胶的组成成分、体积复杂多变，因此对其质量的讨论是十分复杂的。

对于气溶胶，一般用质量密度的概念进行描述。对于有多个组分的气溶胶体系，简单来说，其质量密度可以认为是多种组分质量密度相对于组分含量的加权平均。因此，对存在云朵区域内的气溶胶不同组分的含量和颗粒直径进行测量，通过加权平均的方式，可以大致得出云朵的质量密度。假设空中存在一个体积是 1m^3 的云朵，直观来看，云能够浮在空气中，意味着这种气溶胶的密度是要低于或者等于空气的密度。这里我们取等于空气的密度，约为 $1.29\text{kg}/\text{m}^3$ （这里我们的假设都是非常简单的，实际情况可能非常复杂）。因此，一朵体积为 1m^3 的云朵其质量约为 1.29kg ，大约相当于1L矿泉水或者5个苹果的重量。

09 白云和乌云有什么异同？

这里我们首先要回顾一下从水蒸气到形成降雨的整个过程。我们知道空气中是含有一定量的水蒸气的，而水蒸气从气态凝结成液态（或者固态），需要两个条件，一是温度较低，二是有凝结核，而大气中的凝结核多半为灰尘。对流层高空完美地满足了这两个条件。在水蒸气凝结的初期，形成分离的小液滴（或小冰晶）悬浮在对流层中，这个时候液滴区域密度较小，灰尘少，彼此之间空隙较大，阳光透过率高，衰减很小，云朵呈白色。当液滴积累到一定程度，其区域密度变大，灰尘变多，彼此之间空隙变小。这个时候阳光透过率变小，衰减很大，云朵呈灰色。与此同时，不同液滴也有较大机会相互融合，变成更大的液滴，以致液滴不能再悬浮空中，从而形成降雨。

所以白云和乌云的相同点：都是以灰尘为凝结核的液滴（或冰晶）。不同点：白云液滴区域密度小，一般不会形成降雨；乌云液滴区域密度大，会形成降雨。所以漫天乌云的时候，大概率是要下雨了，赶紧回家收衣服了！



10 为什么雨落下的时候是一滴一滴的，而不是像倒水一样一股水流呢？

雨从来就不是水流：水汽在空中凝结，当凝结得足够大的时候就会落下来变成雨。这里所谓的足够大也没有大到像瓢泼一样。即使是有人在高空向下泼水，最终落到地面的也是水滴。一方面，从水的角度看，下落过程中会受到风的很大影响，这风足以把水吹散；另一方面，先下落的水相对后下落的水做匀速直线运动，也就是说两者距离会越来越远，最终会分离开。这也是自来水管流出的水柱越往下越细的原因之一。



11 为什么空中下落的雨滴无法砸死人？

云层里有很多凝结的小水滴，当小水滴承受的重力大于气流的承载力时便会掉下来。由于气流的承载力是很小的，因此雨滴通常都很小很轻。即便是稍微大一点的雨滴，在下落的过程中也会被气流冲散。

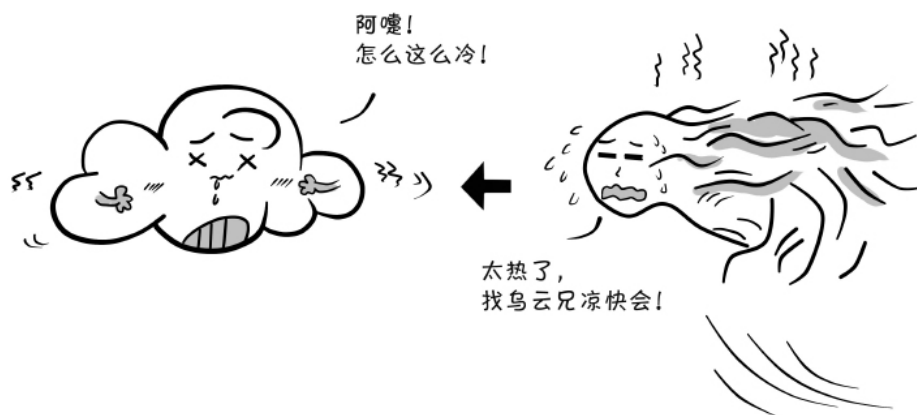
另外，雨滴下落并不是自由落体运动，它会受到空气的阻力，而阻力的大小与速度成正相关，即速度越大，受到的阻力就越大。当阻力增大到和重力大小相同时，雨滴就没有加速度了，会匀速下落，最终匀速运动时的速度为 $9\sim 13\text{m/s}$ ，这个速度并不是很快，所以我们用肉眼就能看见雨滴下落的过程。同时，因为雨滴的直径通常只有几毫米，所以其动量很小，自然就伤不到人了。



12 有道是“山雨欲来风满楼”，为什么下雨之前会刮风呢？

事实上，有风并不是下雨的必要条件，但下雨时确实经常伴随着刮风。我们先来看一下为什么会下雨？一般来说，阳光普照，使水吸热蒸发，水蒸气上升到温度较低的高空中，如果空中富含凝结核，水汽就会凝结成小水滴形成云。此时，这些小水滴还比较小，可以被空气托住。

如果此时遇到冷空气，云中的小水滴就会继续凝聚，逐渐增大形成大水滴，白云变成黑云。当大水滴越来越重，直到空气托不动时，它便下落到地面形成降雨。如果富含水汽的空气遇到的是非常强劲的冷空气，小水滴便会迅速变大形成雷阵雨等极端对流天气。可见，冷空气的出现会促进降雨。而冷空气会给当地带来风：一方面，冷空气的移动自身就会形成风；另一方面，冷热空气之间的对流也会形成风。这也就是下雨之前经常刮风的原因。



13 为什么有的时候白天也能够看见月亮？什么条件下更容易在白天看到月亮？

月球是太阳照亮的，日—地—月相对位置角度不同，我们就会看到不同的月相：望月（满月）就是在地球上恰好看到被太阳照亮的一面的月球；朔月就是在地球上恰好看到背对太阳的一面的月球；上、下弦月就是恰好看到一半被照亮的和一半黑暗的月球；盈凸月、亏凸月就是看到一大部分被照亮的、一小部分黑暗的月球；新月、残月（蛾眉月、月牙）就是看到一小部分被照亮的、一大部分黑暗的月球。

朔月时，月亮在白天出现，但无法看见；望月时，月亮在夜晚出现；新月、残月时，月球与太阳在天上相隔角度太小，容易淹没在太阳的光芒下，所以不容易在白天看到，只能于凌晨日出前在东边地平线附近（残月）、黄昏日落后在西边地平线附近（新月）短暂看到一个月牙；凸月时，月球很亮，月球与太阳在天上相隔角度也大，容易看到，但是出现的大部分时间是在晚上，而在白天只出现在短暂的清晨（西边看到即将落下的亏凸月）和傍晚（东边刚刚升起的盈凸月）；弦月则介于月牙、凸月之间，白天出现的时间和亮度都适中，能在白天看到的时间比较长，但在白天不是很容易看清。

总结：凸月时最容易在白天看到月亮，而凸的程度越大，即月球与太阳在天上相隔角度越大，越容易看到，但能看到的时间也越短。

脑洞篇

01 如果一个人手拿冲锋枪从五楼跳下，从起跳开始手拿着冲锋枪对地面射击，忽略换弹夹时间，这个人能否安全着地？

射出去的子弹相对于射击的人是向下运动的，它有一定的动量，依据动量守恒原理，会给人传递大小相同、方向向上的动量。（枪会有后坐力就是这个原因）

人受到重力作用，会持续地获得方向向下的动量，而射出去的子弹越多，人会获得越多的方向向上的动量。这两个动量如果大小差不多，那人就是安全的；如果子弹提供的动量很小，那么就相当于是螳臂当车，人就不能安全着地了。

我们对子弹所能够提供的动量进行一个粗略的估计。子弹头的质量我们按15g来估计，子弹发射出去的初速度取800m/s，同时这杆枪每分钟可以打出900发子弹，即1s打出15发。因此，1s所能提供的动量约为 $15\text{g} \times 800\text{m/s} \times 15 = 180\text{kg} \cdot \text{m/s}$ 。5层楼的高度大约为15m，人和枪加起来的总质量设为80kg。那么，不开枪从5楼直接跳下来，人获得的动量约为 $1400\text{kg} \cdot \text{m/s}$ ，且从跳下来到落地的时间不到2s。因此，如果持续性朝地射击的话，人在落地时的动量也有 $1000\text{kg} \cdot \text{m/s}$ 左右，相当于是从8m左右直接跳下来，也就是接近3层楼高。

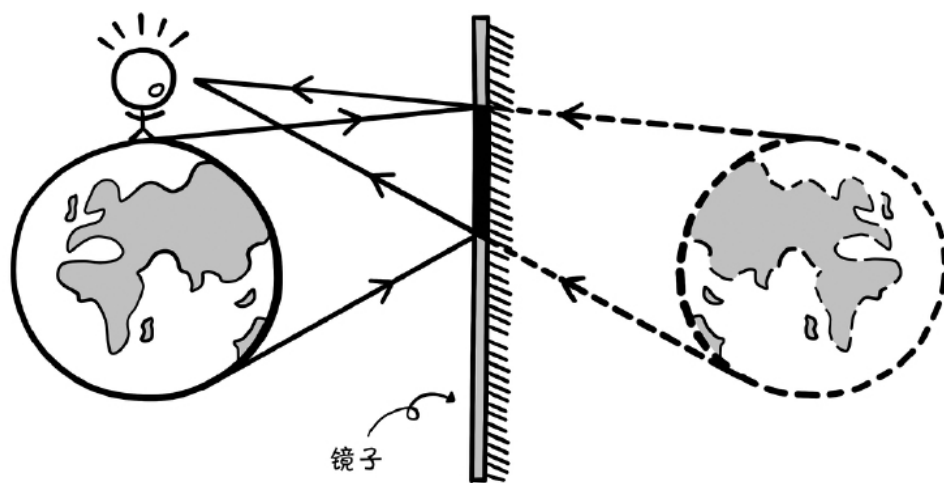
因此，如果这个人有枪，并且还能在下落的时候控制后坐力保持向下射击，那么以他的身手，落地的时候应该可以再接一个前滚翻，所以应该可以安全着地。



02 在天空中多高的位置装一面多大的镜子，可以让我们在地上看到如月亮般大小的地球的影像？

在回答这个问题之前，我们需要回答另一个问题：一个物体看起来的大小和什么有关？显然，看起来的大小不只是由物体实际的大小决定的：天上的飞机看起来很小，但是落在机场的飞机非常巨大。其实，物体看起来的大小是由物体形成的视角决定的。视角就是视线和物体边缘形成的夹角。

所以，只要地球的像形成的视角和月球的视角一样就能保证地球的像看起来和月球一样大。我们知道地球的直径是月球的3.68倍，所以只要像距离地球是地月距离的3.68倍就可以了，也就是约1398400km（取地月距离380000km）。我们又知道，平面镜所成像和物是关于平面镜对称的，所以巨大的镜子需要摆在像和地球的中间位置，也就是距离地球699200km的位置。关于镜子的大小（保证在一个固定点上看到整个像），可以从下图看出。



图中左侧是地球，右侧是地球的像，中间是镜子，从相似三角形的关系可以看出，只要镜子的尺度是像的一半就可以保证看到整个像，所以镜子至少应该是半径为3200km的圆形镜子。



03 为什么人不会飞？

与其回答为什么人不会飞，不如回答鸟为什么会飞。鸟类的身体结构为飞翔提供了可能性：宽大的翅膀覆盖了羽毛，保证了鸟类可以通过扇动翅膀获得足够的升力；中空的骨骼减少了鸟类自身的重量，使飞行更加容易；鸟类强大的胸肌（鸡胸吃起来很糙对不对？）和高效的呼吸循环系统为飞行提供了强大的动力；相比上半身的强壮，鸟类的下肢大多很纤细，这进一步减轻了鸟类自身的体重。这种种因素才保证了鸟类可以飞起来。对比人类自身的生理条件，尤其是粗壮的下肢，你是不是明白了为什么人类不会飞呢？



04 我们能用水浇灭太阳吗？



我们常见的燃烧现象都是物质与氧气发生反应放出光和热的，很多情况下使用水可以将其浇灭。因为水和水汽化产生的水蒸气可以隔绝反应物与氧气的接触，燃烧物没了氧气就会停止燃烧。那么，我们能用水这个方法浇灭太阳吗？太阳燃烧的过程跟上述过程是不一样的，太阳主要是通过自身引力产生的极端环境来产生核聚变而燃烧放出光和热的。这个时候我们往里边加水就不能隔绝它的燃烧了，同时由于太阳表面温度特别高（ 5770K ），水在到达太阳之前就汽化成水蒸气了，并且电离产生的质子还会给太阳燃烧提供燃料。但是当我们添加的水足够多以至于使太阳的质量超过了奥本海默极限（大约是2.17个太阳质量），那么太阳就有可能经历无限坍缩形成黑洞，所以也算是把太阳“浇灭”了吧。

关于奥本海默极限，最早是由朗道提出来的一个想法，当时人们刚发现泡利不相容原理。泡利不相容原理指出任意两个费米子不可能处于同一个量子态。这样，当物质由于引力而收缩的时候，存在一个费米简并压来抵抗这个收缩的过程。但是当引力大到超过这个简并压所能承受的范围的时候，星体就会坍缩。奥本海默和沃尔科夫最早是在托尔曼的工作基础上算出了结果，所以这个极限又被称为奥本海默-沃尔科夫极限。但是他们当时只考虑了费米简并压，所以最初得到的

结果是0.7个太阳质量（小于钱德拉塞卡极限），后来人们加入强相互作用将这个结果修正为1.5~3.0个太阳质量。



05 为什么人跳在地上后不会弹起来，而篮球、足球等物体可以？

在类似于水泥地面的地上，这一过程中地面的形变很小，可以忽略不计。篮球与足球容易发生形变，当落在地上的时候会被挤压，将一部分动能储存为弹性势能，另一部分则被损耗掉了。足球与篮球的形变要维持就需要外界持续性施力，因此摔在地上的球当弹性势能储存到最大后会立刻开始恢复形变，即将储存的弹性势能转化为动能，球就弹起来了。

人体与篮球足球相比，在发生弹性形变的时候，储存的弹性势能要小很多。另外，人在落地的时候人体的肌肉会做功，将动能抵消掉。因此人不会反弹起来，除非地面的弹性很好，如蹦床。

06 假设我有一支功率足够强大的激光笔，照射向500万光年以外的深空，然后我旋转这支激光笔，不考虑途中其他天体引力影响，在足够大的尺度上，光柱（不是指单个光子的传播路径）看起来是弯曲的吗？

在这种情况下，光柱自身的形状确实是弯曲的。如果旋转的角速度已知的话，甚至可以写出光柱的形状随时间变化的表达式。不过，我们在这里给出一个更直观的例子：如果大家用水管滋过水的话应该很好理解，光柱在太空中的运动和水柱在空中的运动（如果担心重力的影响可以只考察水平方向的运动）非常相似，只是粒子运动的速度和空间跨度不同。水柱在空中的形状不光可以是弯曲的，还可以是波浪形的，这取决于你怎么晃动手中的水管。同理，光柱当然也可以是弯曲的。最后强调一点，光柱的形状是弯曲的并不代表光沿曲线传播。光柱的轨迹可以看作很多光线的头部所组成的形状，它的形状和光的传播方向没有必然联系。



07 如果将一个人放在一个地板完全光滑的空旷房间中央，这个人有可能逃脱吗？

首先，我们假设房间比较大，因此我们无法通过改变身体的姿态来接触到房间的边缘。其次，因为地面是绝对光滑的，所以你不能通过蹬地让自己的质心向房间边缘运动。那么是不是就没有办法了？答案当然是否定的。如果你穿了衣服和鞋子，事情就好办了很多，你可以脱掉一两件衣服朝着门的反方向扔去，这样就可以获得朝向门的速度，你只需要慢慢滑向门口就可以了。

如果没穿衣服怎么办？找出身上可以往外扔出去的东西（如口水之类的）就可以了。如果实在没什么可扔了怎么办？那就只能靠气体了，具体操作如下：首先朝门的方向，大口吸气；其次转过头背向门的方向用力呼气，通过反冲可以获得朝向门的速度，重复多次就可以逃脱出去。

08 嗯.....一个64G的手机，装满文件后会变重吗？

会。在解答这个问题的同时，我们需要了解一下各种存储介质的原理。

磁盘：包括磁带、软盘、硬盘等，都是通过磁记录数据的，写入数据会改变其内部物质磁性排列方向，其质量理论上是不会变化的。

光盘：包括CD、VCD、DVD等，都是通过光学结构记录数据的，一般是一次性存储介质，写入数据就是上面刻小坑，刻上就没法抹平了，所以只能刻录一次，之后只能读。写入数据之后，其质量理论上降低了，因为刻了很多小坑。

闪存：包括手机存储、固态硬盘等，都是通过电记录数据的，每一个阱可以有有电子（1）和无电子（0）两种状态，写入数据以后，保存的电子数目有变化，但不一定变多还是变少，所以质量也会有变化的，只是太微乎其微。



09 如果臭氧层破了，我们会怎么样？

臭氧层很重要的一个作用是吸收紫外线，而没有臭氧层，其后果比不打伞、不涂防晒霜去西藏旅游还要严重得多！

臭氧层吸收了紫外线后会将其转化为热能加热大气，形成大气的温度结构，对于大气的循环有重要的影响。另外，正是因为地球有臭氧层，所以才有平流层。如果臭氧层被破坏了，其破口下的区域紫外线强度会增大，同时由于臭氧层结构的残缺，对大气的结构也会有影响。

紫外线对生物的危害很大，如果没有臭氧吸收紫外线，那么人类的皮肤癌、白内障等疾病发病率会大幅上升，而植物也会大面积死亡。

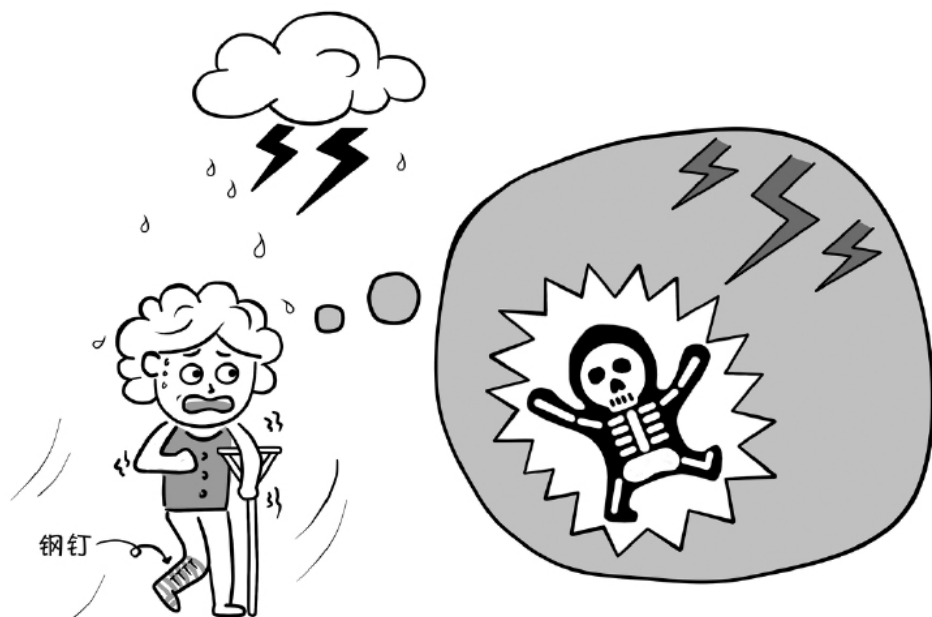


10 身体里有钢钉，雷雨天气会有危险吗？

雷击是雷雨天气中很常见的一种现象，实际上就是一种击穿空气的放电现象。常见的有带电云层间的放电与带电云层和大地间的放电。我们这里关注云层和大地间的放电。

雪雨天云层是会携带大量电荷的。带电云层与地面会形成一个大电容，中间的空气就是介质。对电容稍微了解的同学都知道，电容会存在一个击穿电压，超过这个电压就会击穿介质迅速放电。云层与大地也类似，如果电荷积累到一定数量，就会击穿空气并迅速放电。云层与地面距离较远（几千米到数百千米不等），中间空气电阻太大，必须积累到一定的电压才会击穿。这使得击穿电压很大，击穿电流也很大，如果有人正好处在导电通路里，那就相当危险了。

正如前所述，想要击穿空气，就要将电荷积累到一定数量，相应地，越容易积累电荷，那么雷雨天被雷击中的概率就越大。那么怎样比较容易积累电荷呢？首先，要与大地导通，才能使大地的电荷传导积累。其次，由于电荷喜欢向着曲率小的地方跑，所以越尖锐越容易积累电荷。尖端放电就是个明显的例子。避雷针就是将这两个条件完美地融合到了一起。



铺垫了这么多，现在言归正传，回答这个问题。身体里面有钢钉，一般打在骨头处。只要没有露在皮肤外面，就不会明显地改变人体的导电性质，又没有增加“尖端”，根本就不会增加被“雷劈”的概率。



11 怎样！才能！减肥！

看到这个问题，我的第一反应是这个问题的答案应该非常非常多吧？

于是我上了国内某搜索网站，输入了这个问题。果然不出我所料，首先看到的是各种广告，而往下翻则能看到各种干货、经验贴。

所以粉丝问这个问题，自然是希望得到物理式的答案。

首先告诉你一点——你选对地方了！

在分析这个物理问题之前，让我们先定义一个名词。

表观体重：实验上通过仪器所测到的体重，得到的数据是数字，从几十到几百分布，单位为kg。

我们先来聊一下狭义的减肥，即改变表观体重。

你决定要减肥了，那么此时你的表观体重就是初始值，你当然会有一个目标体重，虽然这个目标体重可能于你而言像绝对零度一样不能通过有限的手段达到.....

从数学上看，就是给定了初末端点，求连接两端点之间的曲线函数，要求满足时间最短或是最“轻松”，这是典型的泛函求极值问题，可以用变分法来解。

找出各种变量后构建出适合的拉氏量，然后求解欧拉-拉格朗日方程，理论上可以解出一个减肥的最佳策略。

嗯，让我们绕开这个数学问题，来一点简单粗暴的物理减肥法。

有个公式我们都很熟悉， $E=mc^2$ 。如果站在质量亏损的角度来看，那么想减小表观体重需要释放大量的能量，所以我们减肥并不是通过这条途径。

我们需要吃饭一方面是为了获取能量；另一方面则是从食物里获取一些人体必需的物质参与人体的合成与代谢，如氨基酸、维生素、无机盐等。从能量的角度来分析，如果摄入的能量比消耗的多，那么表观体重对于时间的导数便会取正值，所以如果长期吃得多却消耗得少就会长肉。

因此想要减肥得从两方面入手，一是减少能量摄入；二是增大能量消耗。

增大能量消耗所要面对的障碍无非就是累和懒，但减少能量摄入则是要抵制成千上万的美食，所以减肥的重心应该放在增大能量消耗上。可以做一些运动，如跑步、跳绳、游泳等。另外，大脑在进行高强度思考时对能量的消耗也很大，如人即便坐着不动，但是在那做数学题，饿得会很快。

接下来我们来聊一聊广义的减肥。

在广义减肥的理论框架里，表观体重只是一个参照，远不及在狭义减肥论中重要。

在进一步讨论之前，我们需要再定义两个名词。

主观体重：与质量无关，是人对自己体重的一个认识。比如在A看来很瘦的B却经常吐槽自己又胖了，而在A、B看来很胖的C则认为自己还是挺苗条的。

客观体重：与质量无关，是别人对你体重的一个认识。比如A对B说：“你看你都胖了，所以这些肉你就都让给我吃吧。”

一个人只有在主观上觉得自己胖了的时候才会决定去减少自己的表观体重，而客观体重的影响最终其实也是在影响主观体重。当一个人主观上觉得自己的体重可以了，他自然就不会想去减肥了。所以，真正要改变的其实是主观体重！

也就是说，我们真正追求的，其实并不是体重秤上的读数，而是自己以及周边的人都认为的苗条、性感。所以可以通过穿衣来凸显自己的苗条，扬长避短。

也许你会说，那上秤不就暴露了吗？

很简单，你只需说三个字——你先上！



12 皮卡丘发的是交流电还是直流电？

皮卡丘究竟是使用直流电还是交流电只和作者如何设定有关，或许作者根本就没有考虑过这个问题，但是我们通过一些现象来进行分析也未尝不可。

我们知道皮卡丘的绝招之一是10万伏特攻击，10万伏特在生活中已经算是很高的电了。因此，我们有理由相信皮卡丘体内有增压装置，最常见的增压手段就是交流变压器，所以皮卡丘是有可能使用交流电的，但是很难想象如此萌物体内竟有线圈和铁芯来实现增压。那么在真实的生物中有没有可以发电的动物呢？确实有，如电鳗、电鲇、电鳐等生物。

电鳗的身体可以看作由一个个“电池”（其实是一个个特殊的肌肉细胞）连接而成，每一个“电池”依靠化学能向两端搬运正负离子形成电位差，由于电池串联电位差相加，导致电鳗首尾之间的电位差可以达到几百伏特，这么大的电位差可以轻松电晕甚至电死其他动物。

不过，电鳗的放电过程不是持续的而是脉冲式的，它不能被严格地归为直流电或者交流电。不过皮卡丘的放电过程也是像闪电一样的脉冲式放电，所以它很有可能采用和电鳗相同的发电手段。但是如果是这样的话，显然皮卡丘的发电能力远远高于电鳗。

当然，最终答案也许只有作者才知道。

13 要多大的声音才能让整个地球都听到？

声音是靠空气振动传播的。声波是纵波，会使空气压缩与膨胀，当声音的强度超过大约194dB（分贝）之后，声波的气压最小的地方已经成为真空（每增加6dB，音量增大一倍）。所以声音继续增大时，对传播距离的增加就不明显了。声波能量的衰减速度与其频率成反比，30°C下10%湿度的空气中，8000Hz的声波衰减速度为262dB/km，这意味着声音传不了多远就听不到了。那有没有什么办法让声波传播得远一点呢？有的。我们来看看频率更低的声波表现怎么样，30°C下，当声波频率为500Hz的时候，声波衰减的速度变成了3.3dB/km。有希望！这时候我们继续考虑192dB的声音，在50km外依然能够听到27dB的音量。什么概念呢？这个音量大概相当于情侣之间说悄悄话的程度。我们把频率再降低一些！当把频率降到了10Hz，已经是次声波了，这个时候人已经听不见了，但是声波的衰减速度变成了惊人的0.011dB/km！依然是192dB的声音，这一次即使在10000km之外（大概相当于从北京到芝加哥的距离），音量依然保留到了82dB，大概能够达到题目的要求了，但是由于是次声波，所以人是听不见的。

当然，实际情况下声音不会仅仅依靠空气传播，声波在固体中的传播速度更快，衰减更小（如敲击钢管的声音可以传到很远），所以实际情形下，情况还是要更乐观一些的。迄今为止，人类记录的最大的声音是1883年的卡拉卡托火山喷发，它导致3万多人死于非命。那次火山喷发释放的能量大概相当于1亿吨当量的核弹爆炸，声音在5000km以外依然听得很清楚。所以总的来说题目的要求还是可以实现，大概只需要一颗小行星撞击地球就够了。

14 电影中刀劈子弹的场景现实中能做到吗？如果能做到，肉体 and 反应需要锻炼到什么程度呢？

我们经常在电影作品中看到主角使用刀劈子弹的场景，《金刚狼》《杀死比尔》等电影中就有类似的桥段，《功夫》中的火云邪神更是直接徒手夹住飞来的子弹。

但是这种场景真的有可能出现吗？如果单纯看刀和子弹的硬度的话，实际上普通家用的刀就可以将高速运行的子弹切开。有人将刀固定在一个平台上然后对着刀开枪，用高速摄影机拍摄下子弹被切开的过程。

但是显然这种“刀劈子弹”不论从哪个角度看都不能满足题目的要求，题目想要的是使用肉眼捕捉到子弹的弹道，然后将其一刀劈开。这就有很大的困难了，迄今为止，还没有人成功做到过。但是有一个日本人却声称能够劈开时速接近 100m/s 的bb弹，他就是町井勋，使用“居合术”中的“一击必杀”拔刀术，将bb弹劈开。町井勋自5岁起拜师学武，现在已经成为居合道名家。曾经创下36分5秒刀砍1000卷草席的世界纪录。

他站在离射手大概20m的位置，在听到枪响之后迅速拔刀，实际上可能更接近把刀“摆”到bb弹要经过的路径上，然后子弹撞到刀上被劈开。但是这离刀劈子弹还有很大的差距。毕竟即使是手枪子弹在一般情况下速度也能达到 400m/s ，显然町井勋对手枪子弹还是束手无策的，更不用说速度更高的步枪甚至狙击枪子弹了。以电影中的距离大约为20m来计算，实际上主角一般还没听到枪响，子弹就已经到面前了。我们假设主角看到火光就出刀，光传播的时间忽略不计。那么50ms内主角就要完成反应和出刀，但是正常人的反应速度在300ms左右，运动员经过特定练习对特定刺激（发令枪）的反应速度可以缩短到150~180ms，人类反应速度的极限目前公认为100ms左右。所以人类基本不可能完成这个任务，而且比反应更难的是捕捉到子弹的弹道，以及挥刀。虽然人类难以完成这一任务，但是不要沮丧，随着高速摄影和人工智能的崛起，机器人很有可能能够实现“刀劈子弹”的创举。先进的高速成像能够实现近每秒4.4万亿帧的拍摄速度，而电机的

速度带动机械臂可以轻松达到所需要的挥刀速度，计算机更是能够以非常快的速度准确计算出子弹的弹道。通过捕捉人类挥刀动作，机械臂也能够实现类似的挥刀动作。日本安川电机就做了一个机器人（更准确地说是一个机械臂）跟町井勋学劈草席的技术。

不过把这些技术整合到一起还有很长的路要走，相信在不远的将来，人类能够造出可以“挥刀劈子弹”的机器人。



15 从物理学的角度来看，中国龙是怎么飞起来的？

除了鸟类，会飞的动物还有很多，它们都有自己的本事，但它们的飞行并不是鸟那种想升就升想降就降，而是一种长距离的滑翔。比如飞鱼、飞蛙和飞蛇（天堂树蛇）。它们都有一个共同点，具有翅膀或者翅膀类似物。比如飞蛙的蹼很大，张开之后可以用来滑翔，而飞蛇是通过不断的收腹，使整个身体变得扁平，像一个倒扣的“U”形管，犹如一个降落伞，在下落过程中增加空气对身体的阻力，以获得100m左右的滑翔。但是龙并不是单纯的滑翔，它是可以自由飞翔的。

从物理学上来分析，飞行就是需要机体的部位克服重力做功，提供和重力平衡的力。动物的形态往往是为了形式特定的功能而进化出来的，要飞的动物，就必须具备一定的特征。让我们从形态入手，先来看看中国龙的形态。

中国龙并没有翅膀，长得有点像鳄鱼+蜥蜴+蛇的结合体。从形态学的角度来分析，它是不能飞的。在这里我们需要进行一个预先的设定，即龙确实是会飞的，但通过让人产生幻觉或者全息投影让人误以为它在飞的情况不在考虑之列。龙的体内存在一个巨大的囊，囊壁密不透气，具有很强的韧性，囊可以通过收缩和膨胀来改变体积。囊的入口有一个生物固体膜，可以对空气当中的组分进行分离。当龙吸入空气时，空气中的氦气被分离并储存在囊中，龙相当于一个气球，可以获得浮力，而多余的气体则快速地从身体下方、后方排出以获得反冲力，这是它快速前进与上升的动力来源。如果要下降，则氦气被替换为空气。当入水的时候，气体被排出，囊中储存水，与潜水艇原理类似。以上的猜想是基于现有的知识做出的。



16 癌细胞是无限增生的，那么可以通过体外培养癌细胞来为人类提供无限食物吗？

细胞对培养液中的营养物质利用率并非100%。以养殖动物为例，要想让动物增重1kg，需要喂食的食物肯定比1kg多，所以获取无限食物是行不通的，因为你得投入更多的食物去喂养癌细胞。

虽然癌细胞可以无限增殖，但是脱离了人体这一舒适的环境，体外培养的癌细胞是十分娇贵的，因此培养它是一件成本很高的事情，养过细胞的同学对这一点应该深有体会。

虽然培养大量癌细胞很难，但如果癌细胞的口感非常好的话，我相信还是会有人来做这个生意的，毕竟没有什么能够阻挡吃货对美食的追求。那么，让我们来分析一下癌细胞究竟好不好吃。大多数癌细胞无氧代谢旺盛，并且缺乏将代谢废物运出胞外的管道，因此其口感会比较酸，甚至会带点腐败的味道。癌细胞表面的粘连蛋白显著减少或缺失，使得它和别的细胞之间不存在黏性，在体内表现为癌症容易转移，在体外表现为松松散散，无法形成块状的肉，大概只能堆积几层细胞。因此，从口感来说，大概会和喝粥差不多.....最后再对比一下肉，肉之所以美味，是因为其中包含了结缔组织细胞、肌细胞、脂肪等，这些原料的配比不同得到了不同的口感，所以动物不同部位的肉吃法不一样。而培养的癌细胞就不一样了，它的组成是均一的。因此，从味道、口感、成本来看，培养癌细胞用于食用都是行不通的。

17 有没有可能存在非常薄却比厚衣服还保暖的衣服？

如果不考虑汗液蒸发散热的话，人体热量的散失的方式主要有三种：热传导、热辐射和热对流。衣服就是通过阻碍这些过程来实现保暖的目的的。虽然衣服的纤维也是热的不良导体，但实际上起到最主要保暖作用的却是纤维缝隙里的空气。目前在常见物质中，几乎没有什么比干燥空气导热系数更小的了。

但这并不意味着纤维本身就不重要了，否则，我们冬天干脆就都穿皇帝的新装了。虽然空气对热传导的阻碍效果很好，但空气很容易通过对流带走热量。因此，保暖衣服要解决的主要问题是保证衣服内存在足量的非对流空气（这也是羽绒服做成块状的原理）。因此，如果能找到导热系数很小的材料做成衣服，就可能实现很薄但保暖却很好的效果，如在身上多裹几层塑料保鲜膜。不过，不透气会让我们的皮肤很难受，毕竟我们傲娇的肌肤既不能暴露在严寒下，也需要保持清新的“呼吸”。



18 如果在地球上搭一个足够长的梯子到月球，人能否慢慢地爬上月球，而不需要第一宇宙速度？ （假设人可以一直爬）

空间电梯的概念最初出现在1895年，由康斯坦丁·齐奥尔科夫斯基提出。相当长的一段时间里，它仅仅只是一种科学幻想。也有不少公司曾计划实施这一项目，但目前为止都未实现，事实上也都是止步于设想，因为找不到一种合适的材料来制造足够强度的缆绳。

这事到底有多难呢？

月球与地面不是相对静止的，月球不能保持在地球一个固定地点的上空，因此无法做一个连接月球和地面的梯子。

退而求其次，这里提出两个备选方案。

方案一：

月球上挂一个梯子，与地面不连接，这个梯子的底端随着月球运动，运动到你身边你才能上梯子。月球大约一个月绕地球一周，但很可能不会经过你身边，或者你可以跟随着梯子跑，这时你需要日行八万里的速度。

说明：由于地月之间的潮汐锁定作用，月球的自转、公转周期相同，始终以一面面向地球，这是这个方案的基础。而如果若干年后地月之间的潮汐锁定完成，地球自转与月球公转也将同步，届时月球停留在地球固定地点上空，则可以使用前述两头连接的梯子。

方案二：

地球上挂一个梯子，上端与月球不连接，每天有一次与月球擦肩而过的机会（相对速度大概是28km/s），把握机会爬上去。

但是哪个方案更容易实现一点呢？

其实爬梯速度的困难是可以通过转乘其他交通工具解决的，毕竟不能真的纯靠人肉爬梯子。真正的困难不在于爬梯子，而在于造梯子。我们来算一下太空电梯到底需要多大强度。

这里我们需要考虑两件事：单位质量（1kg）载荷在不同高度保持稳定所需牵引力，太空梯在不同高度所需比强度，即单位线密度（1kg/m）太空梯要抵抗“自重”（此处自重一词包括了地球、月球引力及“离心力”）在不同高度所需内力。

方案一：

这事比较简单，在地面上你把1kg东西提起来就需要大约9.8N的力，而离地球越远，受地球引力越小，物体就越“轻”。另外考虑到它还要随着太空电梯绕地球转，还有“离心力”在帮你，在绕转角速度确定的情况下，“离心力”离地球越远就越大。

其实即使是在地面上提重物也有“离心力”在帮忙，因为地球有自转。而这个方案中太空电梯绕转速度是一个月一圈，远远小于地球自转的角速度，要到27倍地球半径的轨道高度才能提供相当于地球自转提供的“离心力”。

另外，在越过了地月拉格朗日L2点之后，月球引力占主导，维持稳定就需要反向往回拽了。

这事就难了，要求比强度最高达到60GPa/（kg/m³）。如果1m太空梯自重1kg，那这么长的太空梯要维持“自重”，其各部分所需承受的力量最高可达到6000万牛顿，也就是需要在地面上把6000t的重物提起来的力量。直观一点，10根这种材料要提得起辽宁舰，而这种材料每米只能自重1kg。在材料、工艺固定的情况下，要提高强度难免也要提高线密度，而更高的线密度又需要更高的强度。

方案二：

该方案绕转速度与地球自转同步，故到地球同步轨道高度时“离心力”就能抵抗地球引力了，而再向高处走时，需要反向拉扯以抵抗“离心力”。同样，每次靠近月球时要考虑受月球引力影响很大。

这个方案由于绕地球转动角速度太大，高轨道高度处巨大的“离心力”累积影响使得最高需求的比强度达到 $380\text{GPa}/(\text{kg}/\text{m}^3)$ 。

那我们现在手头上有多强的材料呢？目前最强的材料拉伸强度大约是 7GPa ，是一种碳纤维，可以量产。对于不能量产的，已知的应该是石墨烯和单壁超长碳纳米管，理论上能到 $100\sim 200\text{GPa}$ 。密度都大约是水密度的两倍多。

那么，就算我们造出38万千米长的石墨烯或者单壁超长碳纳米管材料，它最高也就大约提供 $100\text{MPa}/(\text{kg}/\text{m}^3)$ 的比强度，只达到要求的 $1/600$ 。

总结：爬梯子不难，造梯子难。

19 金箍棒重一万三千五百斤，孙悟空挥舞起来就跟我们挥舞普通棍子一样，这是不是力气足够大就可以？

想要像挥舞普通棍子一样挥动重一万三千五百斤的金箍棒，当然需要极大的力气，但是只有力气是不够的。即使不考虑空气阻力，在挥舞金箍棒的过程中，因为金箍棒一直处于变速状态中，所以金箍棒自身会受到很大的应力。如果金箍棒不是用强度特别大的材料制成的话，那么不等它打到妖怪身上自己就已经断了。

还有一点是，金箍棒自身质量很大，如果想把它挥得像普通棍子一样，需要施加非常大的外力。根据牛顿第三定律，孙悟空自身也会受到同样大的反作用力。假如孙悟空体重是75kg，如果在空中挥舞金箍棒使它产生 1m/s^2 的加速度，孙悟空的加速度是 -90m/s^2 ，远大于重力加速度，也就是说他“咻”的一下就飞出去了。

就像体重轻的人很难驾驭重型步枪一样，因为强大的后坐力会让人飞出去。那么孙悟空自身要多重才能驾驭金箍棒巨大的质量呢？按照普通棍子重1.5kg，普通运动员体重75kg计算，孙悟空的体重要达到337500kg才行。看来孙悟空要是一个无敌大胖子才行。

幸亏俺老孙设瘦，
不然可就挥不动这金箍棒了！



综上所述，想挥动金箍棒不仅需要巨大的力气，还要求金箍棒自身很坚固，同时孙悟空要是大胖子才行。如果考虑地面承重能力、衣服强度等因素，还要施加更多的限制才行。这里不再详述。



20 万有引力无处不在，我们是否可以利用它来获取能源，从而使我们生存、发展呢？

我们可以利用万有引力获取能源，事实上我们已经这样做了。潮汐发电就是这样一种技术。

潮汐发电与普通水力发电原理类似，通过建造水库，在涨潮时将海水储存在水库内，以势能的形式保存。然后，在落潮时放出海水，利用高、低潮位之间的落差，推动水轮机旋转，带动发电机发电。

潮汐是由月球和太阳的引力引起的，引力会造成地球上海面升高、降低的周期性运动，这就是潮汐。因此，潮汐发电的能量来源正是万有引力。



21 地球一共有多少个原子？

地球是一个宏观的体系，而原子是组成物质的微观单元，因此在讨论地球有多少原子之前，我们需要先弄清楚如何建立宏观物质与微观原子组成的联系。这个联系在物理学上用阿伏伽德罗常数来表示。它的定义是一个比值，是一个样本中所含的基本单元数，一般定义为 $0.012\text{kg}^{12}\text{C}$ 所含的原子数。目前这个数的数值约为 6.022×10^{23} 。弄清如何描述微观原子与宏观体系的联系，我们就可以用估算的方式大致给出地球原子数目的范围。首先，目前公认的地球的质量是 $5.965\times 10^{24}\text{kg}$ 。假设地球全是由最轻的氢元素组成（这样的假设显然不合理，但可以帮助我们估算出地球原子数目的上限），而一个氢原子的质量为 $1.660\times 10^{-27}\text{kg}$ ，那么按照阿伏伽德罗常数的思想，地球总共的原子数应该是 $5.965\times 10^{24}\text{kg}\div (1.660\times 10^{-27}\text{kg})=3.593\times 10^{51}$ 个。同理，假设地球全部是由目前已知的最重元素——118号Oganesson元素组成，而Oganesson元素的质量约为 $4.880\times 10^{-25}\text{kg}$ ，那么，地球的总原子个数为 1.222×10^{49} 。由此我们可以看出，地球的原子总数应该在 10 的 50 次方量级上。这是一个十分庞大的数字，庞大到如果一个人 1 秒数 100 个原子，那么他也需要大约 3 亿亿亿亿亿年才能数完，要知道宇宙的年龄也不过 137 亿年。



22 为什么只有圆形的泡泡？

当你吹泡泡的时候，无论用什么泡泡圈，吹出来的泡泡都是近球形的，这是为什么呢？从受力方面分析，当泡泡为不规则形状时，其相邻的两点曲率不一样，则表面张力方向不一样，根据受力分析，水会向合力的方向流动，最后平衡状态为相邻两点受力一致，曲率一致。推广到整体，就形成了一个球体形状。



23 为什么红色光和绿色光混在一起可以看到黄色光，而钢琴上的do和mi一起按下去却听不出re来？

这就要从人类的视网膜说起了。人类的视网膜上有视杆细胞和视锥细胞，其中视锥细胞用于感知强光和负责色觉，视锥细胞有L、M、S型三种，分别对红色（Long，长波）、绿色（Medium，中波）、蓝色（Short，短波）敏感。

正是因为有这三种细胞的存在，红、绿、蓝才成为我们人类的三原色。要注意的是，红、绿、蓝之所以是三原色，不是因为物理原因，而是生理原因，如鸟类有四种感知波长的细胞，如果它也像人类一样感知色彩的话，那它的原色是四种。

红色光和绿色光混合可以看到黄色光，那是因为这种混合产生的复色光对视锥细胞的刺激和黄色的单色光对视锥细胞的刺激等效。但这两者本质上是不同的，只是因为人眼的特性，才使得二者看起来一样。事实上，黄色的复色光和黄色的单色光的光谱是完全不一样的。

钢琴上的do和mi一起按下去却听不出re，那是因为do和mi的音混合后和单纯re的音不等效，人耳是可以分辨出来的。



24 怒发冲冠可能吗，毕竟头发——特别是长发——那么软？

当人异常愤怒、开心、激动、恐慌的时候，肾上腺激素会大量分泌，头皮的立毛肌会马上收缩，使得毛发直立，所以，帽子可能会向上冲。

另外，当你摸范德格拉夫起电机（就是静电球）时，假设你醉心科研多年没洗头且头秃得只有两根钢铁般硬的头发（当然还是导体），你的帽子是完美的绝缘体且完美地在头发上保持平衡，重量为100g，你的头发长度为10cm，为了方便计算，再次假设你在真空中，电子为了能够使帽子“冲”起来，自发聚集到头发的两侧，而两根头发以头顶为中心呈对称分布（忽略头发自身的重力），此时，利用库仑定律可知：

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q^2}{r^2}$$

要想使冠“冲”起来，Q大概为 10^{-5} 的量级，考虑到电流的换算，除以时间，电流为不到0.1mA，属于安全接触电流范围，所以，“怒发冲冠”是可能实现的。

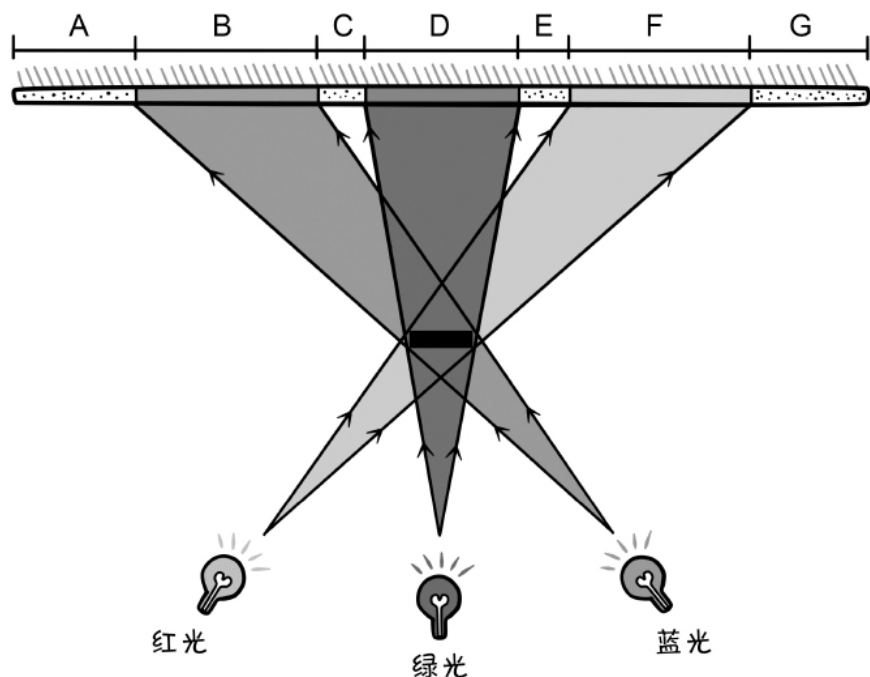
25 火焰导电吗？

要想让某个物体导电就要让它内部存在足够多的自由电子，这样在电场的驱动下才能产生电流。火焰具有较高的温度，高温会增加粒子的动能，使电子脱离气体分子的束缚变成自由电子，整个火焰变成等离子体。因此，当火焰温度足够高时，火焰是可以导电的。我们可以利用火焰导电特性和火焰自身性质相关的特点对火焰的燃烧情况进行监测。比如，可以把一根金属电极插入火焰中，在外加电压的作用下，在喷嘴火焰中产生电流，检测电流的有无就可以判断火焰是否熄灭。



26 影子可不可以是彩色的？

影子可以是彩色的，这需要利用色光三原色的原理。



如上图所示，为了简化，将物体抽象成了一条线段，红、绿、蓝三个光源抽象成了点光源。从图中可以看到，A、C、E、G四个区域能被三个点光源照射到，是白色的，而B、D、F分别是蓝、绿、红三个光源的阴影区。B区缺少蓝光，但可以被红光源和绿光源照射到，根据三原色的成色模式，红光和绿光叠加是黄光，因此B区是黄色的。同理，D、F区分别是洋红、青色的。如果要获得色彩更丰富的影子，可以将图中红、绿、蓝三个光源相互靠近一点，使各自阴影区相互重叠（这样可以得到红、绿、蓝三种颜色的影子），另外，还可以改变光源的强度。



27 人类若同步同向走路，能否扰乱地球的自转？

显然这个问题无法通过做实验来解决，那么我们只能通过设定一些理想的条件来计算这个问题了。

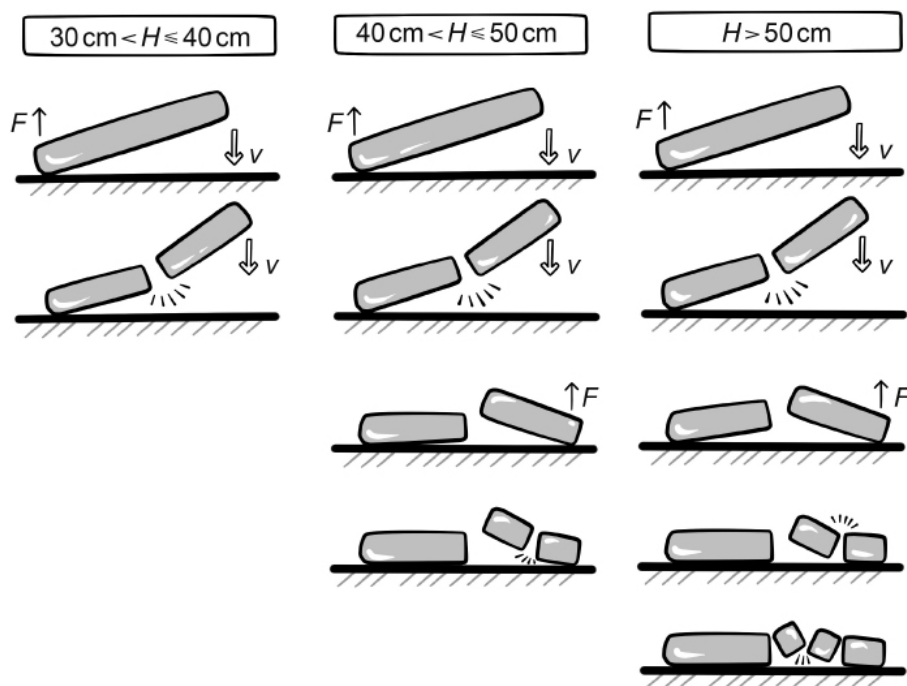
假设地球是一个刚体且有70亿人，人均体重50kg，又假设所有人都从赤道往一个方向以5km/h的速率顺着地球自转方向行走（假设赤道上能站得下这么多人）。另外，还要假设地球质量分布均匀且为完美的球形。地球质量为 $5.965 \times 10^{24} \text{kg}$ ，半径为6400km。那么当人开始走动时，由人组成的环绕赤道的环（后面简称“环”）开始转动，所以它需要从地球中获取角动量，这样地球损失角动量导致角速度降低。具体降低多少可以通过计算得到：环的转动惯量是 $1.43 \times 10^{25} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ ，地球的转动惯量是 $9.77 \times 10^{37} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ ，根据角动量守恒可以看到，地球角速度的变化率约为 $1/1000000000000000$ ，虽然地球的自转角速度确实变化了，但是你说它几乎没变化也没什么问题。



28 为什么粉笔大多数时候掉到地上总是会摔成两半呢？

“粉笔掉在地上，摔成两半”的问题和“弯曲意大利面时很难得到两段”的问题有异曲同工之处。悉尼大学的罗德·克罗斯（Rod Cross）教授在2015年结合实验给出了粉笔摔在地上断裂成几段的解释。

首先他选用长度为78mm、直径为11mm的粉笔，利用高速摄影机发现了粉笔从不同高度摔落到地上的不同现象：在低于30cm的高处落下，粉笔一般不会摔断；在高度为30~40cm的高处落下，粉笔一般从中间断为两截；在40~50cm的高处落下，一般断为不相等的三截；在高于50cm的高度落下，偶尔会断为不相等的四截。如图所示。



在粉笔下落的过程中，粉笔的一端先触及地面，竖直向上反弹，地面对粉笔突然施加一个力矩。如果其速度足够大，地面对粉笔施加的力矩会使得粉笔直接断裂为两段，断裂位置一般在接近中心位置的缺陷处。如果其速度尚且不够大，则不能够直接断裂。在粉笔一端触

及地面时，其两端的速度大小相同，后落地的一端在突然施加的力矩作用下在落地时会得到比先落地一端更大的速度，这个速度如果足够大，也会使得粉笔断裂，这便是粉笔断为两段的情景。

每次碰撞会伴随一定的能量损耗，粉笔在较低的高度落下时，就会多次在地面反弹而不发生断裂；如果粉笔在较高处落下，它首先断裂为两段，其次，未触及地面的一段在下落速度足够大时很可能断裂为两段，这是断裂为三段的情况；如果其首先断裂的一段速度也足够大，当其另一端触及地面时也可能发生断裂，这是断裂为四段的情况。

综上，特定长度的粉笔落地断裂的段数与落地高度直接相关，同时其断裂的方向以及位置也与粉笔的内在缺陷分布、粉笔落地的倾角直接相关。

至于遇到的经常摔成两半的情况，是由于场景限制，高度一般不会发生变化，其断裂的段数对于特定的高度应该是固定的。同时上文提到的具体高度与粉笔材质以及缺陷数量有很大关系，对于具体的粉笔，其对应断裂高度很有可能不同。

宇宙篇

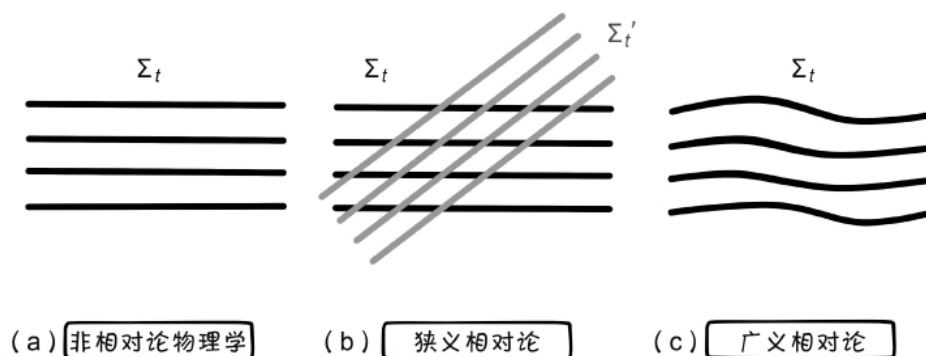
01 为什么宇宙膨胀速度会大于光速？光速不是不可超越的吗？

宇宙的膨胀并不是指宇宙中不同星系以不同速度运动，导致星系间距离变大，而是空间本身的膨胀。换言之，宇宙膨胀是指空间在膨胀，以致某些星系远离我们的“速度”超过光速。物体的运动速度上限是光速，可是这个上限对空间膨胀是没有约束作用的，这并不违反相对论。实际上，星系本身的移动速度只有每秒几百到几千千米，远远小于光速。



02 根据相对论，我们的宇宙是没有一个统一的时间的，时间是相对的。那么我们常说的宇宙年龄138亿年是怎么回事？是相对于我们来说的吗？我们怎么知道一定有一条类时曲线连接我们和大爆炸？

在广义相对论下的时空是一个整体，要分别定义宇宙的时间和空间，就需要对宇宙的四维时空进行如下图所示的3+1维分解，分解为一个三维的空间加上一维的时间。把时空按时间来分层，每一层里的时间相同，不妨叫作同时面。



如图（b）所示，狭义相对论可以有比如 $\Sigma_{t'}$ 和 Σ_t 两种甚至无数种分层方式，它们都相互等价，因此同时是相对的。在广义相对论下的宇宙学中，原则上也可以有无数种分层方式，但是因为我们基于宇宙学原理的宇宙学模型只有一个维度上是演化的，而在另外3个维度上是均匀和各向同性的，把宇宙演化的方向定义为时间的方向，这是一种最方便的分层方式。宇宙的年龄也是在这样一种唯一的分层方式下定义的，同时面也就唯一确定了，就能定义一个确定的时间，这个时间不是相对于某个观测者的，而是宇宙演化本身确定的宇宙标准坐标系。不过由于我们的运动速度不大（相对于光速），引力场不强，我们的时间也可以近似等于宇宙标准坐标系的时间。

确切地说，这样的类时曲线不一定是存在的，在十分接近大爆炸起点的时候（普朗克时间 10^{-43}s 以内），我们也不知道发生了什么，彼

时目前的物理定律失效。但在此之后，存在类时曲线能一直连接到我们现在的世界，比如我们自身在宇宙中所处的位置一直想向前追溯得到的测地线就能够符合要求。



03 普朗克常量是怎么得出的？

1900年普朗克研究黑体辐射问题时，因需要引入了普朗克常量。普朗克假设光场能量是分立的，每份能量的大小是普朗克常量和光频率的乘积，在这个假设下，普朗克一举解决了“紫外灾难”问题。现在，只要在与量子力学相关的场合，就都可以看到普朗克常量，它已经成为最基本的物理量之一。普朗克常量的具体数值可以通过光电效应实验测得，光电效应中的能量关系如下：

$$h\nu = \frac{1}{2}mv_0^2 + A$$

公式左侧是普朗克常量和频率的乘积也就是光子能量，右侧第一项是电子出射动能，A是金属逸出功。可以看出只要测得电子出射动能关于入射光频率变化的斜率就可以求出普朗克常量的数值。现在公认的普朗克常量数值是：

$$h = 6.626070150(69) \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$$



04 什么是反物质？它为什么会很贵？它是怎么形成的？

首先我们给出反粒子的定义：反粒子是相对于正常粒子而言的，它们的质量、寿命、自旋都与正常粒子相同，但是所有的内部相加性量子数（如电荷、重子数、奇异数等）都与正常粒子大小相同、符号相反。有一些粒子的所有内部相加性量子数都为0，这样的粒子叫作纯中性粒子，反粒子就是它本身，如光子、 π^0 介子等。如果反粒子按照通常粒子那样结合起来就形成了反原子，而由反原子构成的物质就是反物质。例如，一个质子和一个电子可以构成一个普通的氢原子，而一个反质子和一个正电子（电子的反粒子，带正电，命名上似乎有点让人混淆）则可以构成一个反氢原子。

至于说为什么反物质会“很贵”（可能用“稀有”来表述会更好），我们知道在平常物质世界中，几乎不存在反物质，而要获得反物质则只能在极端的高能实验室合成，成本很高，所以它“很贵”。事实上，在我们已知的四种基本相互作用中，除了弱相互作用，其他三种相互作用都是C宇称守恒的（可以简单理解为正反粒子都是成对出现和湮灭的），而目前已知的宇宙中正反粒子的数量却是极度不对称的，正粒子远多于反粒子，物理学界对此一直没能给出令人满意的答案。



05 接收到一束光，我们是如何计算出它是从多少年以前从某个恒星上发出的呢？（最好能用公式解答）

通常我们无法直接得知光传播的时间，这个问题只能先转化成天体测距的问题，知道了光“走”了多少距离，再除以光速，就知道传播的时间了。对于近邻宇宙来说，可以用三角视差法、分光视差法等方法测得天体的距离，然后除以光速得到这束光传播的时间。事实上，不同方法测出的距离并不是同一个物理量，它们只是在近邻宇宙的情况下恰好几乎相等而已。如果是遥远宇宙，则需要考虑宇宙膨胀的影响，这些距离、时间并不等同，我们难以直接测得光行距离（就是可以除以光速得到光行时间的距离），而往往是测得角直径距离、光度距离等。研究遥远宇宙中的天体可以测定其宇宙学红移，通俗来讲，越大的红移代表了更远的距离、更长的光传播时间。有趣的是，在光传播的路上，这段距离在不断增加，所以这里面谈论时间、距离都要涉及坐标系选取的问题。

在这里仅给出一种情景：此时此刻我们站在地球上，看到宇宙中传来的一束光，测得它的红移是 z_0 。

$$z_0 = \frac{\lambda_1 - \lambda_0}{\lambda_0}$$

λ_0 、 λ_1 分别是电磁波发射时和被我们接收时的波长。那么在我们看来，这束光传播的时间（回视时间）是

$$t = \int_0^{z_0} \frac{d_z}{(1+z)H(z)}$$

其中

$$H(z) = H_0 \sqrt{\Omega_{\Lambda 0} + \Omega_{k0}(1+z)^2 + \Omega_{m0}(1+z)^3 + \Omega_{r0}(1+z)^4}$$

是红移 z 处的哈勃指数。而 $\Omega_{\Lambda 0}$ 、 Ω_{k0} 、 Ω_{mo} 、 Ω_{r0} 分别是当今宇宙暗能量、曲率、物质、辐射的组分，根据目前理论模型与实际观测，可以分别取值0.73、0、0.27、0。

06 向两个相反的方向发射激光，光线走过相同的距离所花的时间是不是不一样？我这样想是想测量地球随宇宙膨胀的速度。

根本就不是你想的这样的啊！宇宙的膨胀是均匀、各向同性的，没有一个点是中心。就像一个在充气的气球，不是说以气球中心为原点，地球长在球皮上跟着膨胀离中心越来越远；而是整个宇宙就是球皮，随着时间演化（充气），越来越大，上面的任意两个点之间的距离也越来越远。所以向相反方向发射激光，光线走过相同的距离所花的时间是一样的。但是通过观测遥远的星系远离我们的速度（红移），我们可以计算宇宙膨胀的速度。



07 引力波是电磁波还是机械波？

都不是。这才是爱因斯坦厉害的地方。之前人们只知道电磁波和机械波两种波，结果爱因斯坦先是说引力可以扭曲空间，又说这种扭曲可以以波的形式传播，当时有人觉得这是痴人说梦，直到100年后我们真的探测到了引力波。

机械波波动的是物质，电磁波波动的是电磁场，引力波波动的是空间。做个比喻吧，棋盘就像空间，棋子就像空间中的物质。机械波相当于棋子在棋盘上抖动，以棋盘的格子为参考，哪个棋子在抖一眼就看出来了。而引力波则是棋盘在抖动，棋子是钉在棋盘上的，棋子跟着棋盘抖动，作为处在棋盘上的棋子，两个棋子之间的间隔始终是一个格子，根本看不出有什么变化；也就是说引力波来了以后空间变大或变小，棋子也一样在变大变小，连尺子都在一起变大变小，这个过程中你尽管拿尺子量，永远感受不到距离变化，这个距离叫共动距离。但是光能感到变化！光走的是固有距离，就像我们现在站在上帝视角看这个棋盘，棋盘格子的伸缩是看得出来的。所以LIGO天文台用的就是比较两束光走过距离的长短来替代普通的尺子，最终把引力波给量出来了。



08 光子不是有质量吗，那是不是我用一个凸透镜把一束光汇聚在极小的一点上可以制造出一个黑洞？

让我们从凸透镜的角度分析一下这个问题。回想一下在太阳底下玩放大镜的时候，光会聚集在焦点处形成一个很亮的点，可以把纸点燃。现在，仔细回想一下，那个所谓的亮点有多大？事实上它并不是一个点，而是一个比较小的光斑。由于有球差的存在，即便是平行光，在通过透镜后也只会聚焦形成一个光斑，而不是一个点。因此可以想象，当透镜非常非常大时，即便认为太阳光是平行的，光汇聚过来之后也不会是一个密度极大的点，而是一个大大的光斑。

现在让我们再从黑洞的角度来分析这个问题。我们知道，当物体的质量不变时，如果其体积越小则密度越大。对一个质量确定的物体来说，不断压缩将导致其密度越来越大，最终成为黑洞，而在这一过程中存在一个临界半径，即史瓦西半径。当物体的实际半径小于其史瓦西半径时，它就变成黑洞了。假设存在一个非常大的凸透镜，可以汇聚太阳发出的一半光。让我们来高估一下这个问题，认为太阳每秒释放的能量全部都以光的形式发出去了。太阳每秒释放的能量为 $3.8 \times 10^{26} \text{J}$ ，根据爱因斯坦质能方程 $E=mc^2$ 可以知道这些光子加起来的质量有 $4.2 \times 10^9 \text{kg}$ 。

$$\text{史瓦西半径的计算公式为: } R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

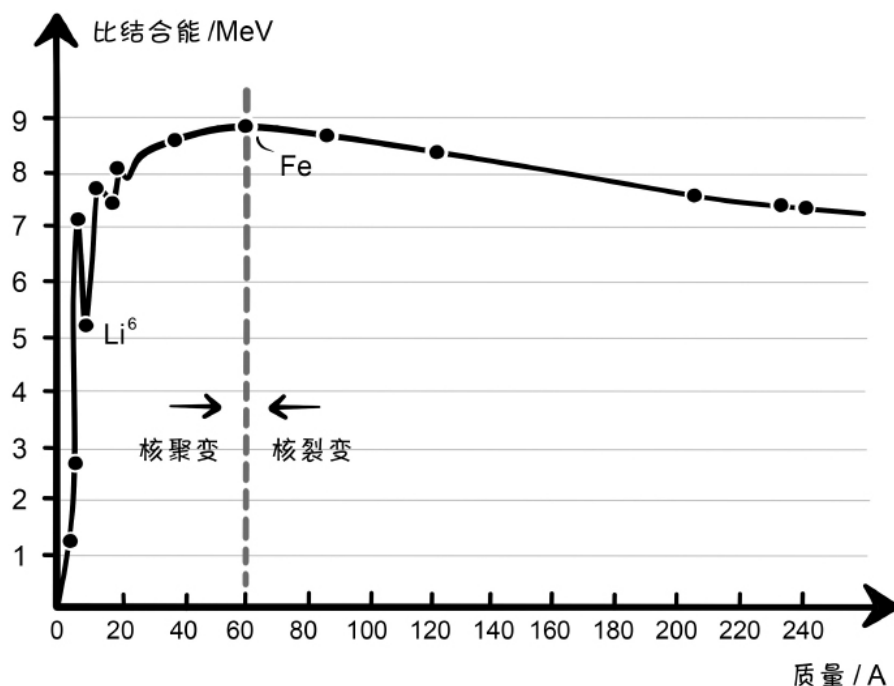
代入数据之后，可以解出这些光子如果要形成黑洞，其史瓦西半径须为 $6.2 \times 10^{-17} \text{m}$ 。显然，当你用放大镜汇聚光线时，那个光斑的半径都要远大于这个值。 $6.2 \times 10^{-17} \text{m}$ 是什么概念呢？氢原子中电子绕原子核运动的半径（即玻尔半径）为 $5.3 \times 10^{-11} \text{m}$ 。

如果真的制造出一个完美成像的透镜，那么光在通过这么大的透镜时会损失很多能量，其次在透镜内部光线逐渐汇聚，温度逐渐升高，还没穿过透镜就会把透镜烧毁……



09 为什么重核聚变到铁就结束了？

要回答这个问题就必须亮出下面这张“比结合能曲线图”了。



先解释一下什么是比结合能吧。所谓结合能，就是孤立的核子（中子、质子）结合成一个原子核所放出的能量，即把一个原子核拆解成单个的核子所需要的能量。比结合能就是结合能除以原子核内的核子数。从这里大家就能发现，比结合能和化学领域中的键能的概念很相似。键能越大，说明这种化学键越牢固，要破坏化学键所需要的能量就越大。比结合能也有类似的特点，铁具有最大的比结合能，因此铁核是最稳定的。其他核若聚变形成铁核，是释放能量的反应，但铁核聚变则是吸收能量而不是释放能量了，因此说重核聚变到铁就结束了。



10 太阳的热量会在亿亿亿.....年后散发殆尽吗？

恒星的命运基本上由其质量决定（还会受恒星自转、成分、磁场、在密近双星中的地位等因素影响），一个是质量越大的恒星燃烧越快，寿命越短（我没说人哟），另一个是恒星的质量也决定了恒星的最终归宿。

恒星的内部进行的是核聚变反应，产生大量能量，其辐射压抵抗了恒星自引力，使其不会在自引力下坍塌。恒星质量不够大的话，氢聚变至氦就终止了。质量足够大的恒星有足够大的压力使氦被加温点燃聚变成碳，再大质量的恒星可以使碳点燃聚变成氧，最后是氧聚变成铁，到这里恒星核聚变的本事就到头了。

质量较小的恒星年老的时候，核聚变能力下降，辐射压不足以抵抗自引力，恒星开始从核心坍塌，外壳冷却膨胀，变成红巨星（或红超巨星）。在最后的负隅顽抗之后，红巨星会爆发，把核心外的物质抛掉，被吹散的外壳形成行星状星云，而剩余的核心质量小的变成白矮星，逐渐冷却至黑矮星；质量大一点的恒星其自引力压力可以战胜电子简并压，变成中子星；质量更大的恒星，其压力可以进一步战胜中子简并压，形成黑洞。

太阳目前是一颗G2V型主序星，已经燃烧了46亿年，预计还可以继续燃烧50亿年。以太阳的质量，它最终会走白矮星这一条路。



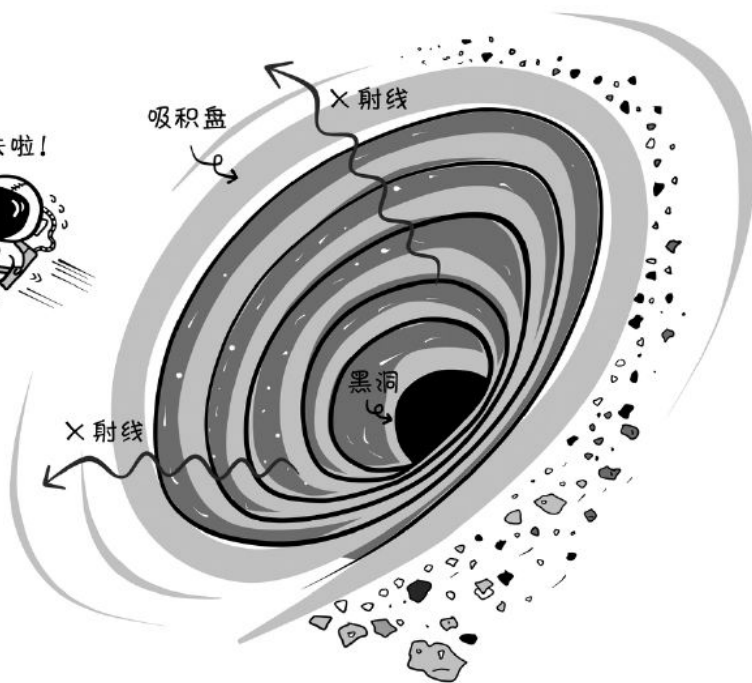
11 黑洞因其强大的引力致使光都无法逃逸，那为什么黑洞还能发出X射线？难道说X射线的运动速度超过光速？

这是因为X射线不是从黑洞内部逃出的，而是从黑洞周围的吸积盘中发出的。

黑洞具有很强的引力，弥散在宇宙中的气体和尘埃会被黑洞的强引力场吸引，逐渐落入黑洞中，因为通常被黑洞吸收的物质具有一定的角动量，所以会旋进式地落入黑洞，在黑洞的周围形成一个盘状的结构，叫作吸积盘。在物质落入黑洞的过程中，一方面引力对它做功；另一方面由于吸积盘不同半径处旋转速度不同（越靠里速度越大），从而产生摩擦力。这两方面的作用使得落入的气体被加热到很高的温度，进而放出电磁辐射。放出的辐射的频率由吸收它们的中心天体所决定。对于黑洞这种致密天体而言，辐射出的通常是X射线。因为发出X射线的吸积盘实际上位于黑洞的视界外部，所以X射线能被观测到就不足为奇了。

广义相对论预言的黑洞神秘而又有趣，但在天体物理中探测黑洞的存在却是不容易的。因为黑洞的吸积盘释放的X射线可以被观测到，所以X射线也是搜寻宇宙中黑洞的踪迹的绝佳线索。实际上，天文学家们也正是通过对X射线的分析，来从浩渺的宇宙中寻找黑洞的。

救命啊
要被吸进去啦！

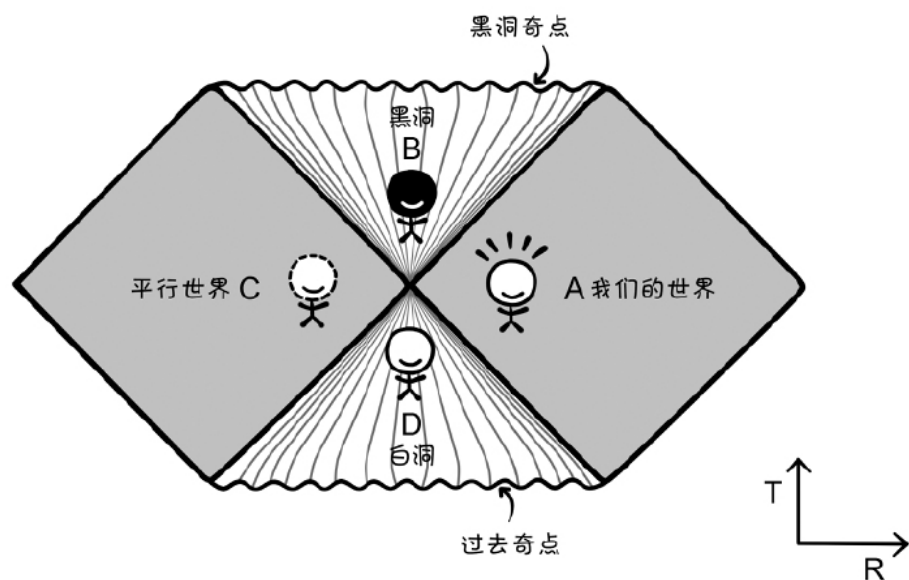


12 黑洞的背后是什么？它吸了那么多东西，都到哪里去了？

黑洞也有不同品种，这里我们只讨论最理想最简单的黑洞——史瓦西黑洞。结论是这个黑洞吸入的东西去了黑洞的奇点。

什么是奇点？这就涉及知识盲区了。

一般的科普都会给出一个叫共形图的东西，根据这个国际惯例，在这里给出史瓦西黑洞的共形图（见下图）。



其中A区域表示黑洞视界外我们生活的世界；B区域表示黑洞视界内部，其最上边的线表示黑洞的奇点；C区域表示另一个渐进平坦时空，与我们的世界没有联系；D区域是白洞，其最下面的线表示过去奇点。C和D区域就比较抽象，不过没关系，接下来的讨论只涉及A和B区域。

图中纵轴是时间，横轴是空间，并且仍然遵守闵氏时空的光锥坐标系，即物质只能在上光锥中传播，如我们发现A区域的东西可以进

入B区域也可以不进入。A区域的东西如果进入B区域，B区域中所有的东西最终的宿命就是落入奇点。

值得一提的是，我们这里只是讨论了史瓦西黑洞，也存在其他黑洞比如克尔黑洞，如果掉进这个黑洞里面，可以选择从黑洞里出来而不是掉进奇点。

13 太阳系为啥是扁平的，有可能是立体的吗？

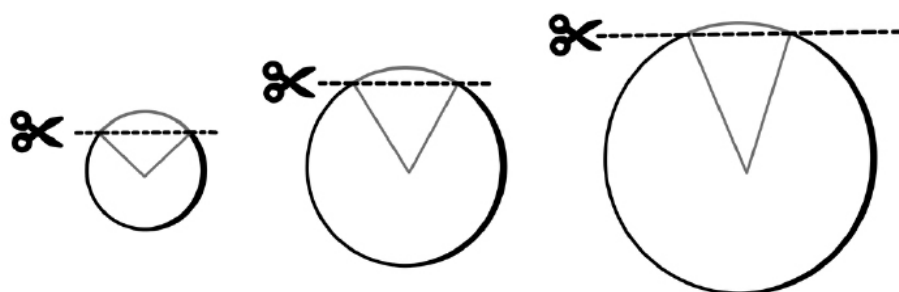
实际上不止太阳系，很多恒星系统包括星系、黑洞吸积盘、土星的圆环都是扁平的。这是为什么呢？让我们来看一下太阳系形成之初发生了什么。根据现有的理论，太阳系形成于46亿年之前。在那之前，太阳系是一团星云，星云里面的物质由于引力作用会相互吸引、相互碰撞然后凝聚在一起，那为什么大部分行星几乎都运行在同一平面上呢？这主要是因为我们生活的空间是一个三维空间。

在三维空间中，一团物质因为引力作用运动和转圈的时候，把它们作为一个整体考虑，就是绕着质心在旋转，垂直于旋转轴的那个平面上下的物质由于碰撞向上和向下的动量抵消了，只剩下平面内的动量，最后表现为所有行星都几乎在同一个平面内运动。实际上根据数学计算，在四维空间中，物质可以绕两个相互独立的轴旋转，就没有上下的动量相互抵消了，最后星系团就会保持星系团的形状，但是那对于生活在三维空间中的我们就是难以想象的了。



14 如何不用微积分的原理给小朋友解释地面为什么是平的而地球是圆的？

在纸上画几个大小不一样的圆，然后做圆的割线，如下图所示。



给小朋友展示线段上方的圆弧，让他再画更大的圆，然后再画割线得出同样的圆弧。可以发现，当圆画得非常小时，上方的弧线弧度已经很小了，会越来越接近“平地”。而我们的地球非常非常大，因此我们站着的地方就是平地了。





15 为什么月亮跟着我走？

我们都有这样的体会，当我们走夜路的时候，一边走一边盯着月亮看，仿佛它是跟着我们在走的。甚至当我们开车的时候它也是以同一个速度在跟着我们，这是为什么呢？这其实是视差在作怪。那什么是视差呢？简单来说，就是离我们越远的物体，它的运动越不明显。比如我们在走路的时候，看到周围的物体角度在明显地变化，我们由此判断出自己在运动，而周围的事物是静止的。这个时候我们去看月亮，由于月亮距离我们非常远，导致我们看月亮的角度变化并不大，就会造成我们相对月亮没有运动的错觉。其实谚语里边说的“望山跑死马”也是这个道理。我们对地月距离的“感知”是非常薄弱的，包括太阳和其他行星也是同样的道理，当我们在走的时候也会觉得它们在“跟”着我们。

视差有一个重要的作用就是在天文上测量天体与我们之间的距离，当地球随着太阳转动的时候，我们在夏天和冬天看到的天空是有变化的，而离我们越远的天体变化就越小。如果把地球在冬天和夏天的位置的连线看作一段圆弧，那么这段弧长除以冬天和夏天远处天体的角度的变化就大致等于地球到天体之间的距离。



16 月球能够用万有引力吸引它地面上的尘土，那么为什么它不能吸引空气分子，反而是真空呢？

因为月球质量太小了，产生不了足够将气体分子束缚在月球周围的引力，所以月球上几乎没有空气。那为什么它能束缚表面的尘土呢？因为尘土的运动速度远远小于气体分子。

当然，行星表面能否形成大气层不仅与行星的质量有关，跟行星表面的温度也有很大关系，我们都知道气体的速度分布是遵守麦克斯韦分布的，有相当一部分气体分子的运动速度非常快，而且相对分子质量越小的气体高速的分子越多，就越容易逃逸，所以地球大气层中氢气和氦气量非常少。当气体接近行星表层的时候，频繁地碰撞使得分子难以逃逸，但是在更高的地方，分子的碰撞很少，速度高于行星逃逸速度（对于月球大约是 2.5km/s ，很明显，很少有尘土会达到这个速度）。而逃逸速度主要跟行星的质量有关，对于地球，这个速度是 11.2km/s 。那为什么一些其他的质量跟月球接近的卫星（如土卫六，质量大约为月球的两倍）表面也有大气层呢？主要是因为土卫六与太阳的距离更远，表面温度更低，表面的气体分子更不容易逃逸也更不容易被太阳风吹走。



17 为什么有时候月亮看起来是银白色的，有时候是橘黄色的呢？

月球发光事实上是反射的太阳光，太阳光在可见波段是连续谱，继而被人眼所见为白色（不懂的同学可以理解为七色光，七种颜色叠在一起就是白色光）。一个物体如果只（主要）反射某种色光，那它就体现为什么颜色，如树叶反射绿色光为绿色，墙反射可见波段所有光所以为白色，墨水几乎不反射可见光所以为黑色。月球也几乎无偏向地反射所有可见光，故而为灰白色，而月球上明显暗淡的“月海”实际上是月球上的一种富含锰元素的玄武岩，对光的反射弱一些，呈现更暗淡的颜色。

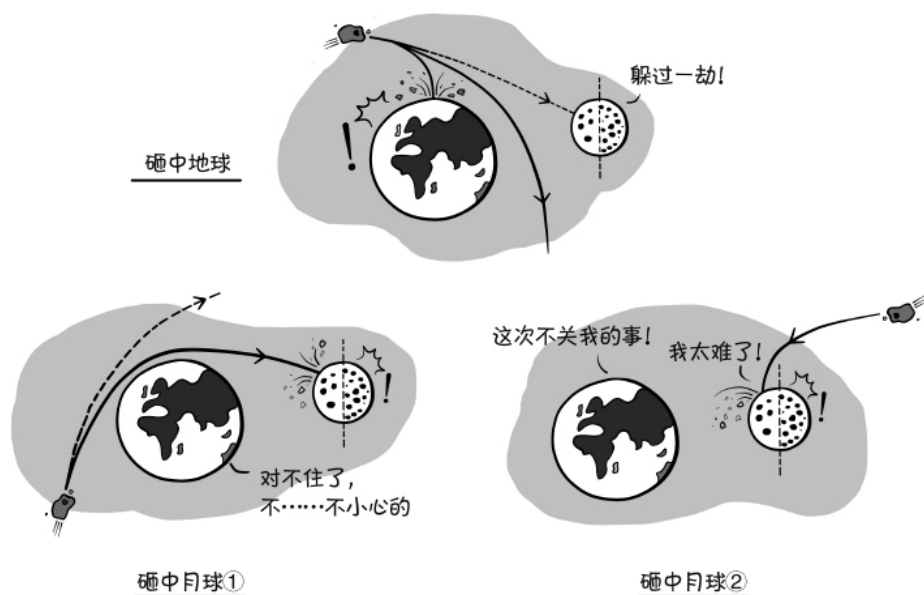
月球反射的光要被我们看到还需要穿越大气层。首先要说明天空为什么是蓝色的，因为大气会散射蓝色光，太阳光中的蓝色光被散射得漫天都是，故而天空是蓝色的。当太阳在地平线附近时，太阳光需要穿过的大气层更厚，蓝色光被散射更严重，所以颜色更红一些，而正当午则偏黄白。月球也是如此，贴近地平线时，月球表现为橙色；在天空高处时，颜色变白。空气越澄澈，月球越白（散射不严重），否则就发黄。月全食时，月球躲入地球的影子，无法被太阳光照射到，但其实仍有部分太阳光经过地球大气的折射到达月球，而这一部分光也经历了地球大气的严重散射，故而偏红，所以月全食时看到的是昏暗的血月。



18 月球总是正面朝向地球，那么其正面的坑是怎么形成的呢？

这位朋友的问题非常好，我们先来了解一下这个问题的背景。月球表面的坑是被陨石砸中形成的，月球由于潮汐锁定，长期以一面面向地球，故而有正反面之分。月球的背面有更多的陨石坑，而正面却更为平坦，这是因为月球正面受到地球的保护。那么地球对月球的保护作用有多大呢？

地球的平均半径为6373km，是月球半径的4倍，而地月间的平均距离是38万千米，也就是中间可塞满30个地球。地球作为月球的盾牌只能遮挡一个很小的角度，约为 2° 。另外，陨石不是从远处像子弹一样直线射过来的，而是会在地球、月球的引力场中进行曲线运动。从地球方向射向月球的陨石大多会受地球的引力而偏离，而偏折角度的大小与陨石原轨道和地球之间的距离、陨石和地球之间的相对速度有关，轨道高度一定时，相对速度越小角度偏离越大，相对速度太小的甚至会反向被地球捕获与地球相撞。（但大部分小陨石在大气层中燃烧殆尽，不会撞到地面上，这种情况就不能称为陨石了）



接下来要回答问题了！既然地球的保护这么到位，那么为什么月球正面还是“挨打”了呢？大概有两种情况，一种是地球可能会把本来没有瞄准月球的陨石偏折到射向月球的轨道。另一种就是背面来的陨石在月球引力下经过轨道的偏折反而在正面撞击。（见上图）

学习篇

01 什么是非牛顿流体？有什么用？

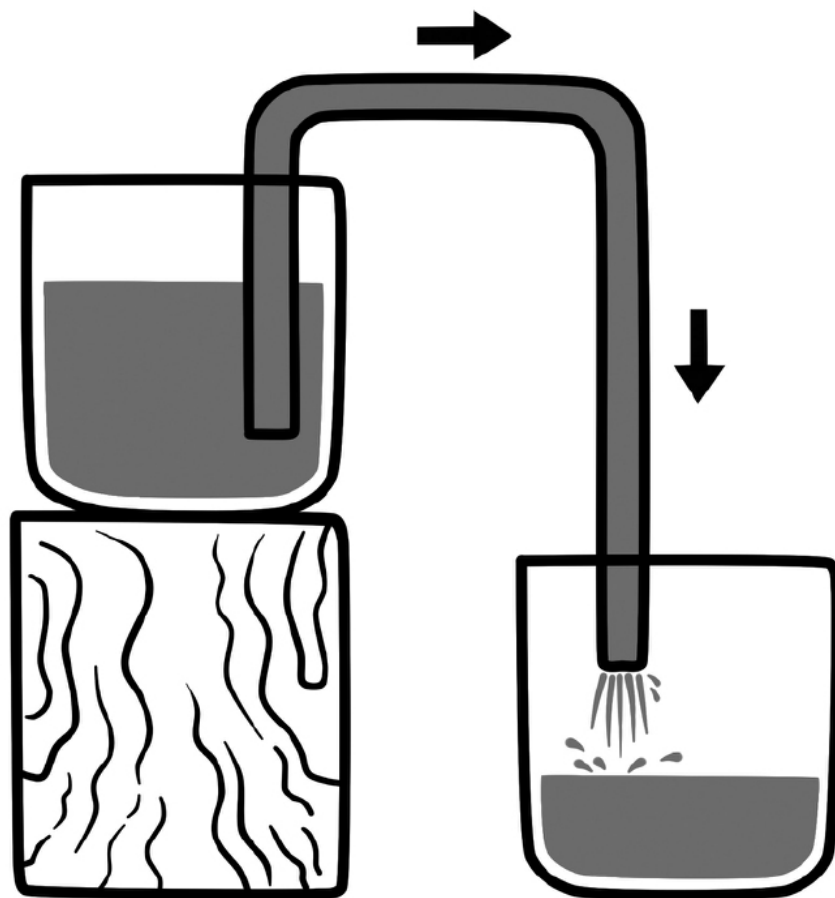
我们经常在一些节目里边看到人在一个装满液体的池子里快速奔跑，参与者的速度稍慢，就会陷下去，掉入池子里，但是他们跑得比较快的时候，却感觉像在地面上奔跑。这是怎么回事呢？实际上，池子里装的是非牛顿流体中的一种，叫作膨胀型流体。这种流体的黏性会随着剪切速率增大而快速增大，也就是“遇强则强”。当液体遇到一个非常快的外部的打击的时候，它的黏度会突然增加变得像固体一样，所以能够支撑起来人的重量，使人不掉到池子里去。太白粉溶液（这里的太白粉指生的马铃薯粉）就是这种典型的膨胀型流体，有节目演示过用锤子去砸太白粉溶液，并不能砸下去，但是如果将手缓慢放入太白粉溶液的时候又感觉没有阻力。由于这种优良的性质，膨胀型液体被用来做防弹衣。常见的膨胀型流体还包括面粉溶液、泥浆等。

当然除了膨胀型流体还有黏性随着剪切速率增大而变大不明显的液体，叫作假塑性流体，这种液体搅拌速度越快，越省力，它会有维森堡效应、开口虹吸现象、熔体破裂、巴拉斯效应等有趣的现象。还有另外一种叫宾厄姆流体，它的性质为在某个范围的作用力下，不会发生形变和流动，只有当外力达到一定值之后它才会发生形变和流动。比如我们常见的牙膏，也是一种非牛顿流体。



02 什么是虹吸现象？它的原理是什么？

狭义的虹吸现象指将液体充满一根“U”形的管后，将开口高的一端置于装满液体的容器中，容器内的液体会持续通过虹吸管从开口低的位置流出，如下图所示，液体克服重力上升的过程中没有任何“泵”的作用。



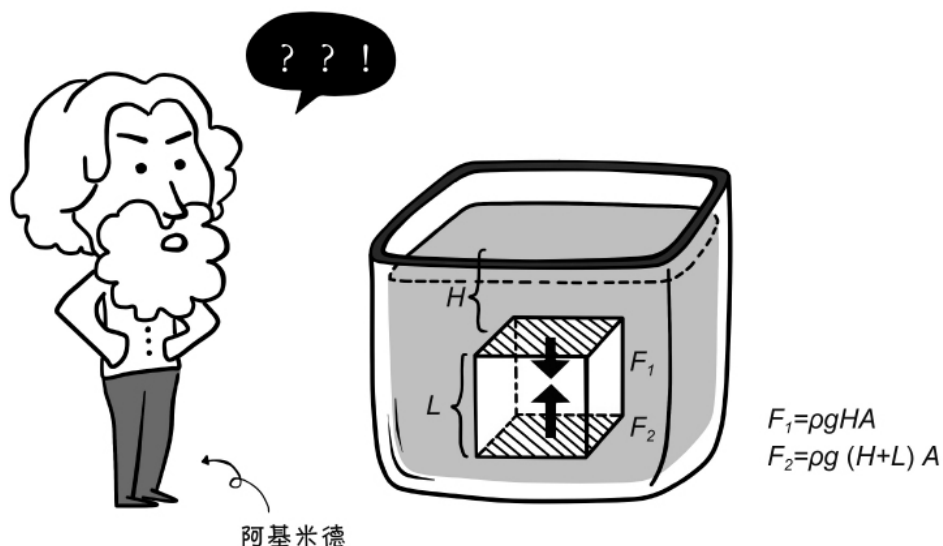
经典的理论认为：液体在重力的作用下从出口流出时，会在虹吸管的最高处产生真空，形成负压，左边的液体在大气压和该负压之间压强差的作用下上升，进入虹吸管，持续不断地从容器中通过虹吸管流出，其中，大气压起着重要的作用，对应虹吸管高度有着一个极限值。但是实验发现，虹吸现象也可以在真空中发生，据此提出了类似于链式模型的“内聚力学说”。



03 如何简要证明阿基米德浮力定律？（最好不要用到高等数学）

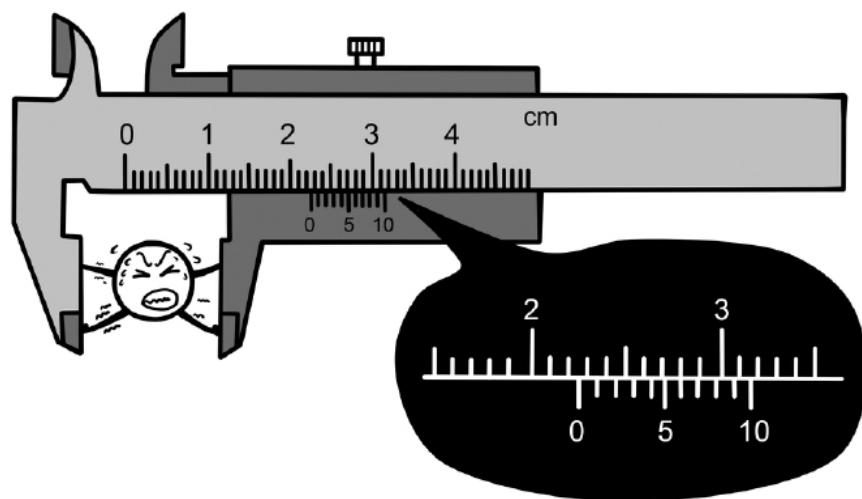
既然高等数学是用来处理变化的东西的，那我们就先让东西不变化以适应初等数学。我们拿一个长为 L 、底面积为 A 的立方体竖直浸入水中（没有比这个更简单的情景了）。我们不妨假定现在知道了初中的物理知识：水中的压强与深度呈正比 $p=\rho gh$ ，先看立方体前后左右四面的受力情况：这四个面不用数学计算（否则又得积分），利用对称性可知，前后和左右面显然都受到大小相同且方向相反的一对互相抵消的力，所以这四个面上的受力抵消了。

现在看立方体上下两个面，如果上面浸入的深度为 H ，那么上面会受到水向下的压力 $\rho g H A$ ，而下面所在的深度则是 $H+L$ ，受到向上的力 $\rho g (H+L) A$ ，那么，这两个力互相抵消之后剩余向上的力 $\rho g L A$ ，也就体现为浮力。现在我们来看看阿基米德原理是怎么描述的：物体所受浮力等于排开液体的重力。排开了多重的水呢？排开了体积为 LA 、密度为 ρ 的水，其重力为 $\rho LA g$ 。



04 游标卡尺的工作原理是什么？

游标卡尺由主尺和附在主尺上能滑动的游标两部分构成。主尺一般以毫米为单位，即一格刻度对应1mm，而游标上则有10、20或50个分格。以10分格为例，其10个分格加起来一共是9mm，即每一个刻度对应着0.9mm。



如上图所示，被测小球的直径实际长度是游标的刻度0所指的位置。但这一位置位于主尺的两个刻度之间，即其直径为2.2~2.3cm，只能精确到1mm。十分度的游标卡尺可以提供0.1mm的精度。读数时先读出0刻度左侧的数值，然后再看游标第几条刻度与主尺刻度重合，乘以0.1mm加到主尺度数上即可。

假如游标的0刻度正好处于2.2cm的位置，则游标的刻度10正好位于3.1cm处，因为游标的刻度之间间距为0.9mm，此时前9个刻度都不会与主尺的刻度重合。对第一刻度来说，其位于2.3cm左侧1mm—0.9mm=0.1mm处，因此当游标的0刻度往右移动0.1mm时，其第一条刻度便与主尺重合了，此时测量的长度便是 $2.2\text{cm} + 0.1\text{mm} = 2.21\text{cm}$ 。而当0刻度往右移动0.2mm时，刻度1跑到了2.2cm右侧0.1mm处，但此时刻度2则正好与主尺刻度重合了，因此测量的长度便是 $2.2\text{cm} + 0.2\text{mm} = 2.22\text{cm}$ ，以此类推。



05 地球轨道上，卫星中的设备是处于失重状态的，那么电机带动的转盘是不是不需要考虑其转动惯量了呢？是不是说转盘的转动惯量近似为零呢？

物体的转动惯量既和它的质量有关，也和它的质量的几何分布有关。两者不论是在地球上还是在失重环境下都是客观存在的。所以在失重状态下，转盘也是具有转动惯量的。我们从质量入手来分析一下直觉上的错误。我们可能认为在失重状态下物体不受力也可以飘起来，所以物体没有质量。其实不然，物体的质量是物体自身保持自己运动状态对抗外界干扰的属性。虽然失重状态下物体可以自己飘起来，但是你想让它改变运动状态还是需要对它施加外力的，而且它的加速度和在地球上一样满足 $F=ma$ 。而在地球上物体需要外力才能飘起来的原因是物体时刻受到重力的作用，只有施加外力抵消掉重力才能让物体飘起来。对于转动惯量也是一样的，转动惯量可以看作物体维持自身角动量的属性，想要改变转盘的角动量，一定要给转盘施加力矩才行。正是因为这个特性，陀螺仪才有指示方向的功能。



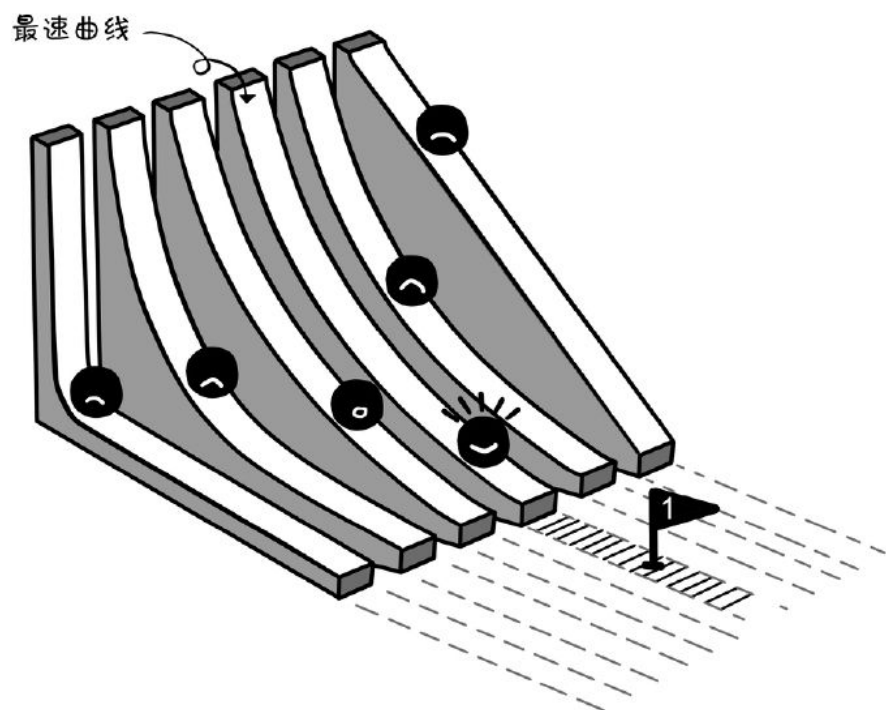
06 真空的意思到底是什么？真的是什么也没有吗？

一般情况下，在实验室中定义的真空，笼统来说，只要是低于大气压就可以算作真空。但是，低于大气压的状态有很多，所以我们对真空进行分级。其中，低真空的压强为 $10^5 \sim 10^2 \text{Pa}$ ；中真空的压强为 $10^2 \sim 10^{-1} \text{Pa}$ ；高真空的压强为 $10^{-1} \sim 10^{-5} \text{Pa}$ ；超高真空的压强小于 10^{-5}Pa 。

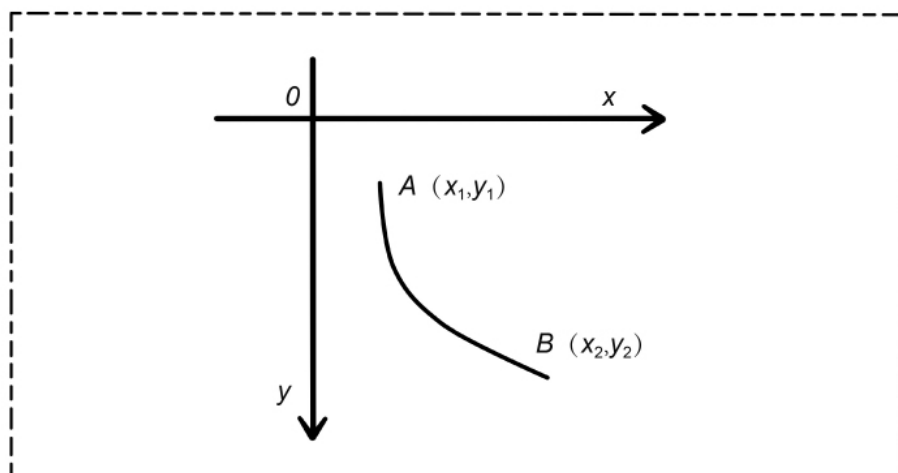
随着人们越来越多地利用一些精密仪器，不论是用来生长材料、显微观测还是能谱测量等，都对真空环境有非常大的要求。其原因就是真空并不是什么都没有！不论人们利用何种泵来获得真空环境，真空中都会有杂质分子。其区别就是，在生长或观测的样品上，几分钟就沉积一层杂质分子和几小时沉积一层杂质分子的区别。

真空的定义可以有好几个层面，在量子力学或场论中，真空是哈密顿量处于基态的一种状态。

07 什么是最速曲线？原理是什么？



最速曲线，从字面上理解，就是“速度”最快的曲线，这里的“速度”是指平均速度、瞬时速度，抑或是速率。物理上有一个著名的最速落径问题。竖直平面内，不在同一铅垂线上的两个固定点之间的许多条曲线路径中，能使质点以最短的时间从高位置点到低位置点自由落下的那条曲线，称为最速落径，是一条旋轮线。



如图所示， A 点坐标 (x_1, y_1) ， B 点坐标 (x_2, y_2) ，质点从 A 点沿曲线无摩擦下滑到 B 点，我们以 A 点同时作为零势能点和坐标原点，质点 (x, y) 代表其运动轨迹，根据能量守恒定律，不难得出质点下滑的瞬时速率为：

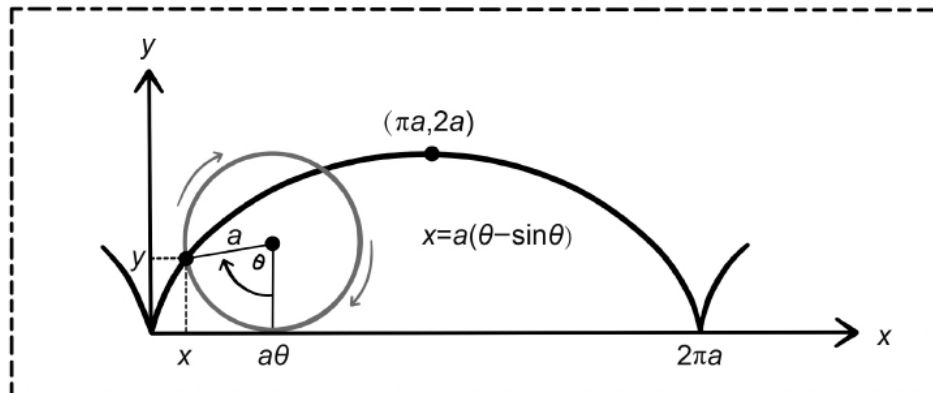
$$mgy = \frac{1}{2} mv^2 \rightarrow v = \sqrt{2gy}$$

利用弧长公式得到下滑的总时间为：

$$t = \int_{AB} \frac{ds}{v} = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\sqrt{1+y'^2}}{\sqrt{2gy}} dx = \int_{x_1}^{x_2} F(y, y') dx$$

下面需要对时间求极值，以得到最短时间对应的 y 的方程，利用欧拉方程求解，最后得到：

$$\begin{cases} x = \frac{a}{2}(\varphi - \sin\varphi) \\ y = \frac{a}{2}(1 - \cos\varphi) \end{cases}, \quad a \text{ 为常数}$$



此参数方程对应的旋轮线即为“最速曲线”。关于欧拉方程的详细求解，可以参考卢圣治主编的《理论力学基本教程》（第二版）180～187页。



08 为什么物体加速度的大小跟物体质量成反比？

一般我们接触到的情况是给出力和质量，求加速度，用到的公式是 $F=ma$ 。从公式可以看出，当力大小不变时，物体加速度大小和质量成反比。但要真正解答这个问题需要知道力和质量是如何定义的。我们把讨论限制在牛顿力学的范围内，以下讨论提到的加速度均指质心加速度。首先让我们忘掉关于牛顿第二、第三定律的知识，从头开始了解力和质量：以物块相互碰撞的情况为例，假设我们所掌握的技能只有测量物块的位置和时间（利用尺子和钟表就能做到这一点，显然这不需要任何关于力学的知识），就可以计算物块的速度和加速度。

下面我们让物块A和B相互碰撞并测量它们的加速度。你会发现，无论A和B怎样相碰，它们的加速度总是方向相反且大小之比是 $a_A/a_B = x_1$ ；接下来让A和C相撞得到： $a_A/a_C = x_2$ ；同样有 $a_B/a_C = x_3$ 且 $x_3 = x_2/x_1$ 。其中 x_1 、 x_2 、 x_3 都是常数，不随碰撞的形式而改变。这些都是通过实验直接得出的结论，可以当作自然界自身的性质。只要我们将任意一个物块和A碰撞过程中的加速度之比记录下来，就可以计算任意两个物块碰撞过程中的加速度之比。所以，两个物体碰撞过程中加速度之比只和物块自身的某个性质有关，而与碰撞方式无关。我们把这个性质定义为质量 m ，它的数值定义为两个物体的质量之比是加速度之比的倒数（定义1）： $m_A/m_B = a_B/a_A$ 。如果将A的质量定义为单位质量，那么通过测量与A碰撞时的加速度可以测量其他任何物块的质量。同样，可以把加速度和质量的乘积定义为力 $F=ma$ ，这就是牛顿第二定律。我们还能发现，碰撞过程中两个物体所受的力大小相等、方向相反，这就是牛顿第三定律。通过上面的分析可以看出，与其说加速度大小和质量大小成反比，不如说质量定义为加速度的反比。

读者可能还有疑问：从上面的分析看，质量还可以有其他的定义方式，如质量之比等于加速度反比的平方（定义2）。为什么非要选加速度的反比？其实，按照定义2的方法也可以建立力学体系。但是真正应用的时候会非常复杂混乱。比如，两个物体的质量之和并不等于将两个物体看作一个整体的质量，这不符合我们对质量的定义。选择定

义1主要是因为它形式简洁、用法简单，而且在引力理论中，定义1得到的惯性质量等于引力质量。

最后提供一道思考题：按照定义2，两个质量为1的物体合在一起质量是多少呢？

09 不受外力的转动的物体的转动惯量改变时为什么遵循角动量守恒而不遵循机械能守恒？

首先要明白一点，角动量守恒是一定不受合外力的，因为要保证体系角动量守恒就要使外力矩为零，显然不受外力的情形满足这个要求。但是不受外力并不能保证体系机械能守恒，因为机械能守恒条件是体系里只有保守力，所以即便体系不受外力，如果体系内包含非保守内力，体系就有可能机械能不守恒。比如，如果不考虑空气阻力，悬空自行车旋转的车轮最终也会停止转动，因为自行车内部的摩擦力会把机械能转化成热，机械能自然不再守恒。



10 同是曲线运动，为什么平抛、斜抛运动加速度不变，而匀速圆周运动就与众不同？

曲线运动有很多种，其加速度方向由受力方向决定，所以曲线运动的加速度可以朝着任何方向。不同的加速度会形成不同的运动轨迹。题目可能想问的是：同样是万有引力（忽略地球自转、公转和空气阻力造成的影响）提供加速度，为什么平抛和斜抛运动的加速度可以看作一直不变，而绕地球表面的匀速圆周运动的加速度一直在变？这是因为抛体运动的加速度并不是绝对不变而是近似不变。因为抛体运动的运动范围比较小，在这个范围内可以认为引力的方向一直不变。但是严格来说，地球表面的抛体运动都是椭圆运动的一部分，加速度是一直指向地心的，所以也在时刻变化。



11 为什么在碰撞中完全非弹性碰撞动能损失最大？

能量是守恒的，但是能量的形式比较多，动能会转化为热能等，因此碰撞的前后动能并不一定相等。而在碰撞的过程中动量是守恒的，也就是说碰撞前的总动量和碰撞后的总动量是相等的。

动量和动能是对应的： $E_k = \frac{p^2}{2m}$ ，式中 E_k 为动能， p 为动量。

如果要求碰撞后的总动能，相当于是在给定了 $p_1 + p_2$ 下求的 $\frac{p_1^2}{2m_1} + \frac{p_2^2}{2m_2}$ 的值。显然总动能是 p_1 与 p_2 的函数，既然是函数就可能存在极值，而 p_1 与 p_2 的和是一个定值，因此实际上只有一个变量，即如果知道了 p_1 ，那么就知道了 p_2 ，因此实际上就是一个一元函数求极值的问题。这个函数存在极小值，解出来的 p_1 与 p_2 正好就是完全非弹性碰撞的情况。



12 绝对零度时，分子会停止运动吗？

以量子力学里的一维谐振子势为例，能量 $E = (n + \frac{1}{2}) \hbar \omega$ ， n 最小取到0，此时 E 始终大于0。即便是绝对零度，分子仍具有一定的能量，即零点能，因此还是会运动的。

我们知道微观粒子具有波粒二象性，而波是不可能静止的。

根据不确定性原理 $\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$ ，如果微观粒子静止，则意味着 $\Delta x = 0$ ，那么此时 Δp_x 将趋于无穷大，既然有了动量，那么自然就是运动着的了。

所以绝对零度时，分子不会停止运动。



13 为什么降低气压液体沸点会降低？

当液体沸腾时，在其内部所形成的气泡中的饱和蒸气压必须与外界施予的压强相等，气泡才有可能长大并上升，也就是说沸点是液体的饱和蒸气压等于外界压强时的温度。外界气压降低之后，液体所需要达到的饱和蒸气压也会降低，因此沸点降低。

从微观角度看，升高温度会使液体分子热运动加快，使液体分子更容易从液体中逃逸出去，而逃逸的分子会与大气中的气体分子发生碰撞，进而被撞回液体一部分。当大气压降低后，气体分子的密度下降，因此，升高温度时液体分子更容易逃逸出去。



14 离心力可以消减重力加速度吗？

地球在自转，因此地球表面的我们便在做圆周运动，那么自然就受到向心力，万有引力提供了向心力。而把向心力这一部分减去之后，就是我们所受到的重力。圆周运动如果保持角速度不变，则半径越长所需要的向心力越大，因此赤道上重力加速度小，而两极重力加速度大。

最后说一下离心力和向心力的关系。离心力是在非惯性系中引入的惯性力，使得牛顿定律能够继续成立，离心力与向心力大小相同、方向相反。因此离心力越大，重力加速度越小。



15 为什么玻璃棒这类物体能够引流？

中学化学中讲到，用量筒量液体时要平视液体的凹液面。虽然看起来是液面凹陷下去了，但实际上是和玻璃接触的液体被吸引过去了，因此间接地形成了凹液面。液体之间存在表面张力，而液体和固体之间也存在作用力。如果固体对液体的吸附能力强，则会形成凹液面；而如果吸附力比液体表面张力小，则形成的是凸液面。从现象来看，就是液体会沿着玻璃壁流下。因此，在倾倒时，液体容易沿着瓶口从瓶外壁流下，必须增大倾斜角以利用液体重力来对抗器皿的吸附力，这种操作伴有一定的危险。当用上玻璃棒时，玻璃会吸附液体，因此液体就顺着玻璃棒流下去了。

16 胡克定律只适用于弹簧吗？

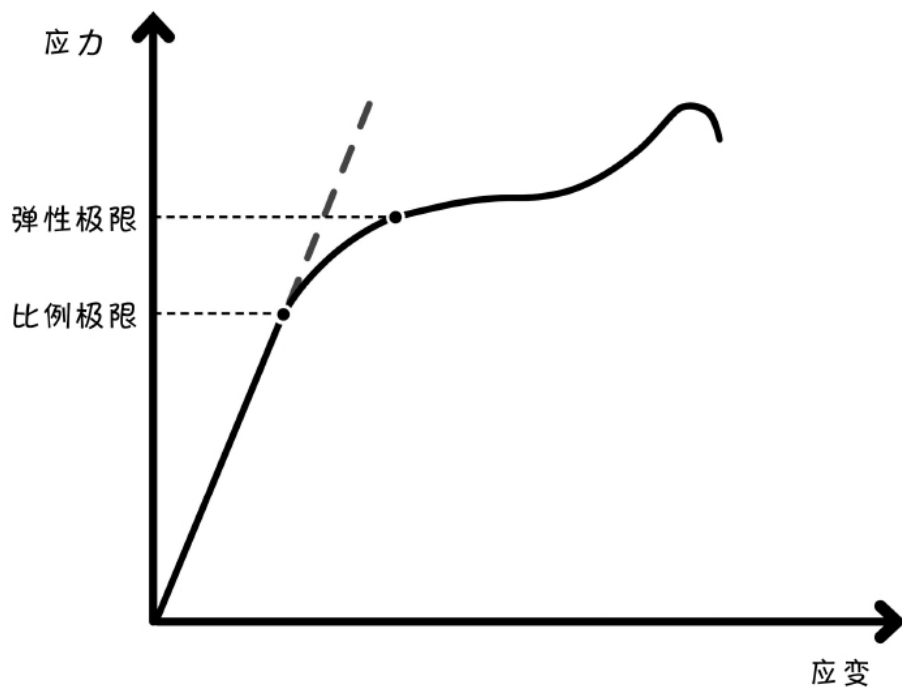
当然不是了！

当你去拉一个弹簧时，你会觉得拉得越开所需要的力越大。回想一下，除了弹簧，是不是还有很多东西也有这个特点？比如橡皮筋……

事实上对于固体材料来说，受到外力之后都可以发生形变，此时在物体内部各部分之间产生相互作用的内力，以抵抗这种外力的作用，并试图使物体从变形后的位置恢复到变形前的位置，在所考察的截面某一点单位面积上的内力称为应力（ σ ），而变形的程度称为应变（ ε ）。

$$\varepsilon = \lim_{L \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta L}{L} \right)$$

在应力低于比例极限的情况下，固体中的应力 σ 与应变 ε 成正比，即 $\sigma = E\varepsilon$ ，式中 E 为常数，称为弹性模量或杨氏模量。 E 是材料本身的性质，与材料的宏观形状无关。



因此对于力 F 来说，有

$$\frac{F}{S} = E\varepsilon = E \frac{\Delta L}{L}$$

式中 S 为应力作用的面积。

对于弹簧来说，其横截面的面积 S 在伸长时几乎不变，而其原长 L 也是确定的。因此把上述的公式变一个写法，即

$$F = \frac{ES}{L} \Delta L$$

此时 ES/L 就可以看作常数 k ，由于应力和应变的方向相反，因此式子前需要加上负号，这就成了我们熟知的胡克定律。

事实上对于任何材料，只要它在比例极限的范围内，就符合胡克定律。

◆◆◆

17 为什么水的比热容最大？

首先，我们先给出一个客观事实，水的比热容 $[4.2\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})]$ 虽然大，但不是最大的，如氢气 $[14.3\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})]$ 、氦 $[5.0\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})]$ 等都比水的比热容大。

其次，我们从物理概念的角度出发来解决这个问题。比热容，应该定义为单位质量的物质升高 1°C 吸收的热量（这里是单位质量的物质，而不是单位体积的物质，大家特别注意一下）。从物理量的定义来看，物质分子量越小，吸收热量越大，比热容就越大。

水升高温度吸收热量大的原因在于氢键，一是氢键多，二是氢键能量大。温度升高的过程，伴随着氢键解离的过程，直到水达到沸点附近。

当然水的分子量小，也对其比热容大做出了突出的贡献。如果你仔细去研究下比热容表，可以发现，许多小分子量物质的比热容都是很大的。

18 为什么分馏可以用来分离混合液体，难道液体只有在沸腾状态下才会变成气体吗？

分馏是分离几种不同沸点的混合物的一种方法，实际上就是利用液体沸腾时发生液体—气体相变进行的多次分馏。这种相变是一级相变，具有相变潜热，此过程中蒸汽和液体的温度不会持续上升。通过外接的冷凝管收集该温度下的蒸汽，将不同沸点成分的液体分离出来，冷凝收集是根据测得蒸汽温度是否发生变化来判断是否为同沸点成分的液体。

在液体稳定存在的前提下，液体和气体的相互转化在微观角度上看其实是分子热运动的结果，分子热运动是每时每刻都存在的。在封闭系统中，液体和气体的相互转化在宏观上存在一个动态平衡，单位时间内液体转化为气体分子的数量等于气体转化为液体分子的数量，转化的速度与温度有关，此时气体的压强为该温度下的这种液体饱和蒸气压。对于开放系统，由于气体分子会向外扩散，无法达到动态平衡，液体会持续转化为气体，这个过程即为蒸发，蒸发在升温过程中的任何温度下都能发生。沸腾实际上是一个剧烈的蒸发过程，但只会在达到沸点后发生，这也是分馏利用沸腾而不利用蒸发来分离液体的原因。



19 焰色反应的根本原理是什么？

我们把少量金属样品或者含有金属元素的试剂放在无色火焰上灼烧，不同种类的金属会把火焰变成不同的颜色，这就是焰色反应。之所以出现不同的颜色，是因为不同金属原子内部的能级不同，能级就是原子中的电子所被允许的能量状态。

比如，在氢原子中，能量只能是 -13.6eV （ eV 是一种能量单位）、 -3.4eV 等。在不同的金属中，电子所被允许的状态也是不同的，利用这个特点我们就可以区分不同的金属原子。

焰色反应和能级有什么关系呢？金属原子在火焰的灼烧下会从低能量状态转变到高能量状态，然后又转变到低能量状态，同时伴随发光，发光的颜色由两个不同能量状态之间的差值决定。

所以，我们可以这么理解焰色反应：不同的金属原子具备不同结构的能级，不同的能级结构意味着电子在不同能级之间跃迁时会放出不同能量的光子，不同能量的光子表现为不同颜色的光。所以我们可以用火焰不同的颜色来鉴别原子的种类，这就是焰色反应的本质。



20 盐水可以降低溶液熔点的原因是什么？有没有升高熔点或升高/降低沸点的方法？

要回答这个问题，我们要先来看看水是怎么结冰的。当温度降低到冰点以后，水分子开始不那么“自由”了，相邻的水分子之间开始形成氢键，并自发形成有序的晶体结构，最后形成冰的结构，每个水分子都相对固定地在一个小的区域内振动。

其实这是一个动态平衡的过程，不断地有水分子脱离这个结构，同时又不断地有水分子参与进来，形成相对固定的晶体结构。但是盐的加入打破了这个动态平衡，盐离子与水分子结合起来，使得参与形成冰结构的水分子变少了，减弱了上述动态平衡的第二个过程，但是当温度继续降低，又会重新形成一个新的动态平衡，反映到宏观上就是熔点降低了。

至于提升水的熔点，通过加压有希望实现，不过需要加到635MPa，这是6000多个大气压了，在那以前熔点几乎不怎么变。降低气压也能提高熔点，但是只能提升0.01K，实在是太不给力了。还有一种方法就是加特定溶质，如 CaCl_2 ，当 CaCl_2 的质量分数超过38%以后，熔点就会超过0°C。

若提升沸点，加压就可以了，我们常用的高压锅就是通过提升压强来提高沸点的，降低沸点也可以通过降低压强来实现，高原地区水的沸点都比较低，所以他们要用高压锅。除此之外，向水里加盐也可以提高水的沸点，向水里边加酒精可以降低水的沸点。



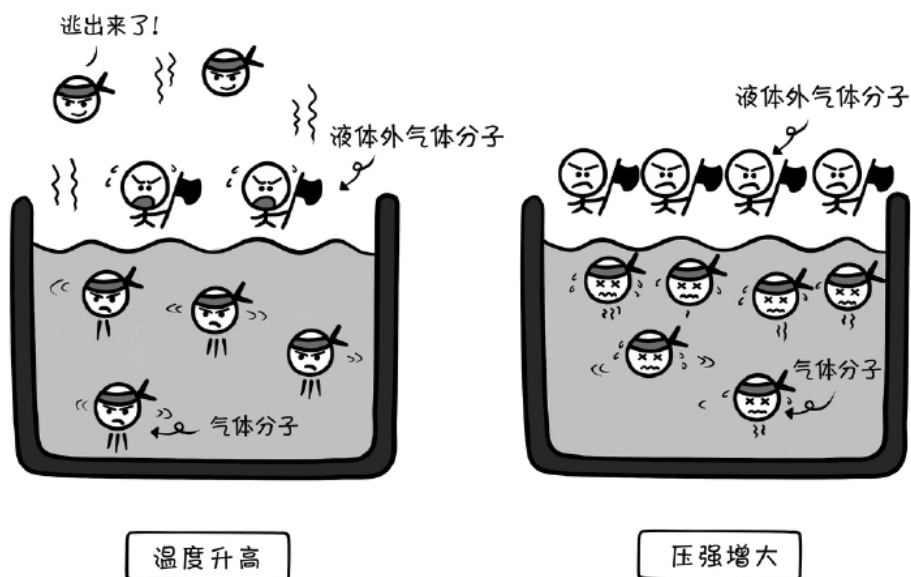
21 如何理解“晶体是空间平移对称破缺的产物”这句话？（原子位置的周期性破坏了任意平移的不变性）

首先解释一下对称性自发破缺的概念：当系统哈密顿量（或拉氏量）具有某种对称性时，它的基态可能会是简并的，若系统最终不能处于这些简并态的叠加态，而是由于涨落，任意选择其中的一个不具有系统对称性的态，那么该系统的对称性自发破缺了。理解对称性自发破缺机制最好的例子就是用Ising模型来刻画磁体的自发磁化问题：我们知道Ising模型本身具有一种 Z_2 对称性，也就是对于将所有自旋翻转过来这样的操作，系统会保持不变，所以它的基态有自旋为+1和自旋为-1这两个简并态。但是由于热力学涨落的关系，系统最终只会选择这两个态中的其中一个，而不会选择它们的叠加态。至于原因，简单来说就是它们的叠加态是一种长程关联的态，在热力学极限下会很快退相干，极度不稳定。显然，无论系统最后选择的是自旋全部为+1还是-1，系统的基态都不再具有 Z_2 对称性了，如果此时我们测量该系统的磁化强度的话，会发现系统具有自发磁性，而磁化方向取决于系统选择了哪个态。

同理，晶体相变也一样：系统哈密顿量包括原子的动能和原子间相互作用两个部分，前者与原子坐标无关，后者只与原子间相对位置有关，因此系统哈密顿量具有连续的平移对称性（即对于将所有原子向同一个方向移动相同的距离这样的操作，系统保持不变）。但是同样由于热力学涨落，系统的基态是每个原子只会占据在规定的位位置这样的晶体态，只具有相应的晶格平移对称性，所以说系统的连续平移对称性自发破缺了。

22 为什么气体溶解度会随着温度升高而降低，随着压强增大而增大？

气体溶解到液体里是一个动态平衡的过程，实际上不断地有气体分子从液体中逃逸出来，又有气体分子溶解到液体当中去。当温度升高时，气体分子的热运动加剧，因而更容易从液体表面逃逸出去。而当压强增大时，相当于是液面外的气体在挤压要逃逸出来的气体，因此就不容易逃逸出来，此时单位时间内进入溶液的气体分子要比从溶液中逃逸出来的分子多，因而溶解度增大，直到达到新的平衡，即单位时间内进入溶液的气体分子与从溶液中逃出的气体分子数相等，此时溶解达到饱和状态。



23 pH指示剂的原理是什么？

酸碱指示剂本身是弱酸或者弱碱，会和溶液中的氢离子或者氢氧根离子发生反应，生成共轭酸或者共轭碱。酸碱指示剂本身和生成的共轭酸或共轭碱表现出不同的颜色，从而能起到指示pH的作用。

比如高中生物书上用来检测二氧化碳的溴麝香草酚蓝，属于弱碱，它在pH低于6.0时显黄色，pH高于7.6时显蓝色。

而平时使用的pH试纸是广泛的pH试纸，由百里酚蓝、甲基红、甲基橙、溴麝香草酚蓝、酚酞和溶剂按一定配比配制后再在纸上干燥而成的，因为含有指示不同pH值范围的指示剂，且不同指示剂显示的颜色不同，所以能依靠丰富的颜色变化来指示很宽的pH值。



24 我同桌告诉我铊（Tl）一般不是正三价，但铊不是和铝（Al）属于同一族吗？

我们从简单的原子核和核外电子的角度考虑，原子序数越大，意味着原子核质子越多，对核外电子的库仑吸引力也越大，也就意味着电子速度会很大，甚至接近光速。这个时候我们就需要想到狭义相对论效应。这个时候电子的质量大于静质量 m_0 （如Hg，1s电子质量 $m \approx 1.2m_0$ ）。根据Bohr原子模型，电子轨道半径和电子质量成反比，也就意味着s轨道出现收缩，而外层的d、f电子，由于收缩产生的屏蔽作用，减少了库仑吸引力，从而出现了膨胀，即这一效应使内层轨道的能量降低，而外层轨道能量升高，也就对应常说的相对论性收缩以及膨胀，主要分别作用于s、p轨道以及d、f轨道。

我们也常用相对论性效应来解释惰性电子对（表现比较明显的就是 $6s^2$ ），比较常见的就是金（Au）及其周边的 $6s^2$ 惰性电子对效应，表现为有-1价的类卤素性质的金，0价相对稳定的汞单质，相对稳定的+1价铊等。当然铊也有+3价，就像铅也有+4价一样，铊在失去p电子以后再失去 $6s^2$ 电子导致的结果就会表现出强氧化性，不再稳定了。



25 永磁材料的磁性是怎么产生的？

永磁材料，即能够长期保持磁性的材料，也称为硬磁材料。其特征为：矫顽力高、剩磁大、磁滞回线面积大。永磁材料分为铁氧体永磁材料和合金永磁材料。最常见的铁氧体永磁材料就是自然界中直接可以获得的磁铁（ Fe_3O_4 ）。合金永磁材料则包括最先能够大量生产的永磁体淬火马氏体钢以及稀土永磁材料。三代稀土永磁材料分别为 SmCo_5 、 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 和 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 。

我们这里以稀土永磁材料为例来解释其磁性起源。稀土永磁材料主要是由4f稀土族元素和3d过渡族元素构成的金属间化合物。

3d金属元素的原子磁矩主要来源于3d电子，而晶体场会导致3d电子轨道磁矩被冻结，因此磁性主要来源于未抵消的自旋数。前面提到的Fe和Co电子组态分别为 $3d^6 4s^2$ 、 $3d^7 4s^2$ ，对应的金属表现为铁磁性。

稀土元素的原子磁矩主要贡献来源于4f电子。而4f电子由于受到外层6s、5p电子的屏蔽作用，表现出局域性。同时根据RKKY相互作用，即局域电子和传导电子间的交换作用，导致传导电子自旋极化，从而形成间接耦合，表现出铁磁性（这里不考虑Friedel振荡等复杂的情况），从而产生自发磁化。



26 一块磁铁，靠近铁芯，铁芯被磁化后其周围磁场会增强，也就是说磁场能量增大了，此处增加的能量从哪里而来？

铁磁性物质的磁性是由宏观上足够小微观上又足够大，并带有磁矩的小磁畴表现的（每个磁畴可以看作一个超小的磁铁）。在没有被磁化时，磁畴随机指向各个方向，磁畴产生的磁场会相互抵消，所以物质并不表现出磁性。当有外界磁场时，磁畴受到外界磁场的作用而指向外界磁场方向（可以想象很多个指南针在磁场中的情况），这就是磁化过程。磁矩在磁场中具有的能量如下公式。

$$E = -\vec{M} \cdot \vec{H}$$

其中 E 是能量， M 是磁矩， H 是磁场强度，并且 M 和 H 同方向。

由此可见，在磁化过程中，铁磁性物质中的磁畴之间相互作用的能量降低。损失的能量一部分转化成了电磁场的能量，另一部分由于转化成了热量在磁化过程中释放了出去。



27 为什么切割磁感线会产生电？

首先，磁感线只是人们为了描述磁场而提出的一个概念，你把一堆铁屑隔着一个木板放在一个磁铁上边，然后轻轻敲打木板，铁屑会沿着磁感线的方向排布。与之类似的还有铁磁流体随着磁场的变化舞动。

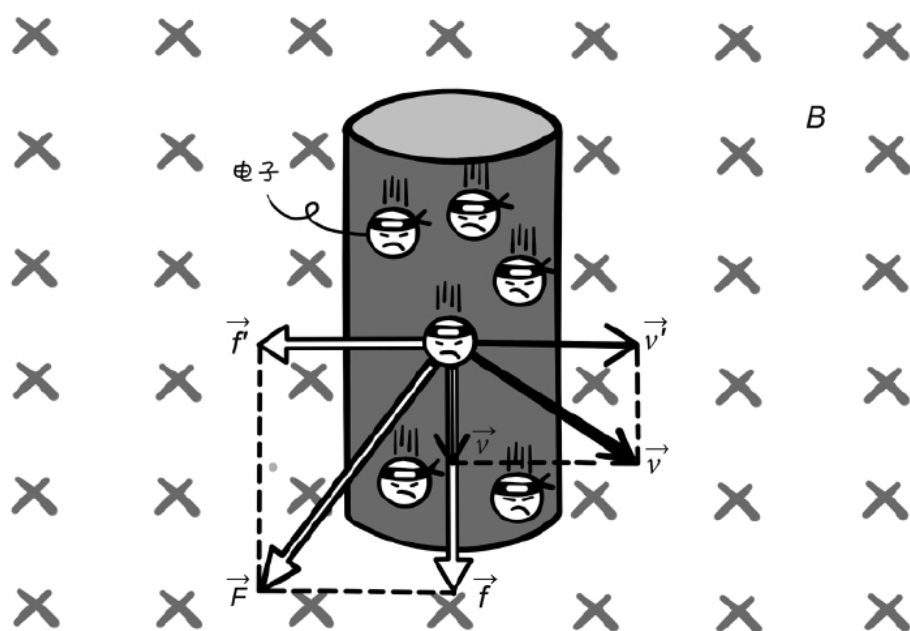
在切割磁感线的时候，是导体沿着与磁场方向夹角不为0的方向运动。考虑最简单的情形，导体棒垂直于磁场方向向下运动，由于导体里有自由电子，自由电子随着导体棒向下运动就有一个向下的速度 v ，那么它会受到洛伦兹力，在垂直于 v 和 B 的方向上形成电流。

除了切割磁感线，变化的磁场也会在导体中感应出电流。1831年，法拉第发现电磁感应现象（1832年被美国科学家约瑟夫·亨利再次独立发现，电感的单位就是以亨利命名的）。

麦克斯韦由此发现了更为基础的麦克斯韦方程组（加上洛伦兹力定律即可导出经典电动力学所有方程）。这里有一个很有意思的思考是电磁感应只与磁场和导体的相对运动有关，而与单是磁场的运动或者单是导体的运动无关。设想你与导体相对静止，那么就会看到磁场相对于你的运动，你会认为电流的产生是由磁场的运动导致的。当你与磁场相对静止时情况会反过来，所以电流的产生不依赖参考系的选取。爱因斯坦关于这个问题和当时人们找“以太”总是失败的思考催生了狭义相对论，感兴趣的读者可以拜读一下经典论著《论动体的电动力学》。

28 安培力是洛伦兹力的宏观表现，但洛伦兹力永不做功，为什么安培力还能做功？

大家在学习安培力的时候，遇到这个疑问时，课本上给出的解释是，安培力只是洛伦兹力的一个分力，所以安培力做功而洛伦兹力不做功。



图中导线以速度 v 向右运动，其中电子受到洛伦兹力 $f=evB$ ，在洛伦兹力 f 作用下，电子以速度 v' 向下运动，受到洛伦兹力 $f'=ev'B$ 。

一个力所做的功，可以用合力与合位移的内积计算，也可以求各个分力做功的代数和，使用第二种方法，则计算得洛伦兹力做功为

$$\begin{aligned} A &= (\vec{f} + \vec{f}') \cdot (\vec{v}' + \vec{v}) \\ &= \vec{f} \cdot \vec{v}' + \vec{f}' \cdot \vec{v} \\ &= evBv' - ev'Bv = 0 \end{aligned}$$

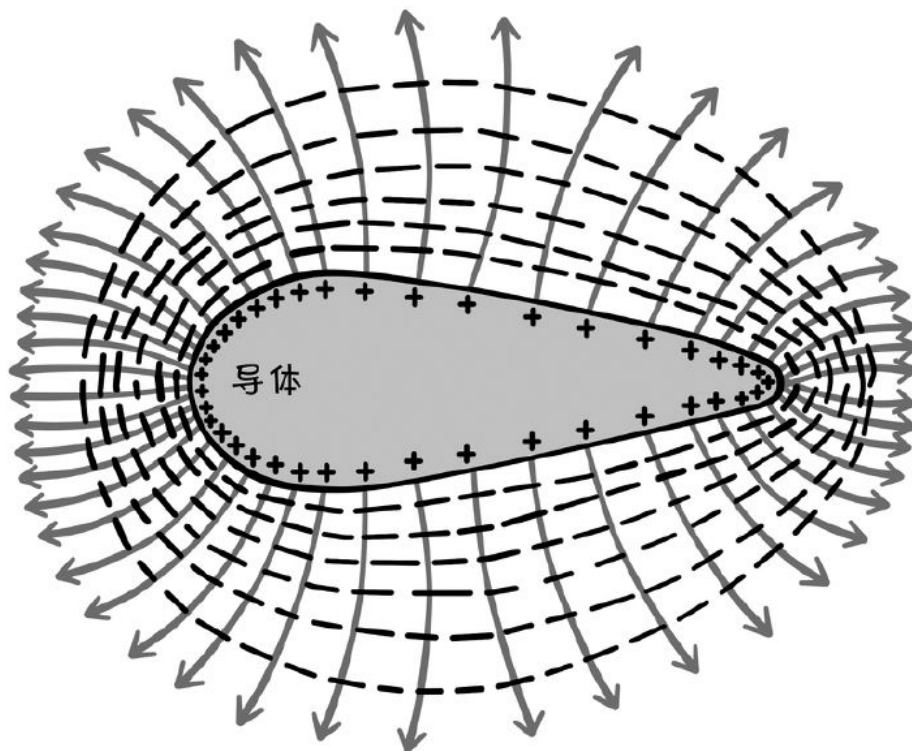
表现为洛伦兹力不做功。

这个时候，洛伦兹力更多地起到中介的作用，将非静电力做功转化为电势能。

29 为什么带电导体处于静电平衡时，静电荷分布在导体表面，而且曲率半径大的地方电荷密度小？

静电平衡是指导体中自由电子无定向移动（热运动一直存在），电场分布不随时间变化。无论导体带不带电，它在外电场的作用下，自由电子向电场的反方向做定向运动，由此产生的感应电场与外电场方向相反且随着自由电子增多而增大，直到与外电场相等、内部电子停止定向移动，达到静电平衡。电荷在表面是其定向移动的结果。

导体表面的电荷分布情况不仅与表层的曲率有关，还与导体本身的形状特性有关，受周围介质分布情况以及导体的带电状况影响。对于孤立带电导体而言，定性的规律是，曲率越大，电荷分布越密集。值得注意的是，电荷密度与曲率之间不存在单一的函数关系。





30 想知道一节电池是怎么确定电动势的，或者说为什么设计好之后电池就刚好有这么大的电动势，这与哪些控制因素有关？

电池的电动势其实是电池内部各相界面上所形成电势差的代数和。电池内部有三种电势差：接触电势差、液接电势差和电极与电解质界面间的电势差。接触电势差是由于不同金属的费米能级不同，需要依靠接触电势差来补偿费米能级的差异；液接电势差是两种不同电解液，或者同一种电解液但是浓度不同的溶液接触产生的电势差；在电池中，接触电势差和液接电势差都很小，电动势主要受电极与电解质界面间的电势差影响，该电势差与电极和电解质有关。

以大家很熟悉的锌铜原电池为例，在标准状况下，相对于氢标电极电势， Zn^{2+}/Zn 为 -0.7628V ， Cu^{2+}/Cu 为 0.3402V ，那么可以得到标准状况下，锌铜原电池的电动势是 $0.3402 - (-0.7628)\text{V} = 1.1030\text{V}$ ，当然随着反应的进行，电解质中组分的活度不会一直维持在“1”，因此实际情况中，锌铜原电池的电动势是要应用能斯特公式来计算的。

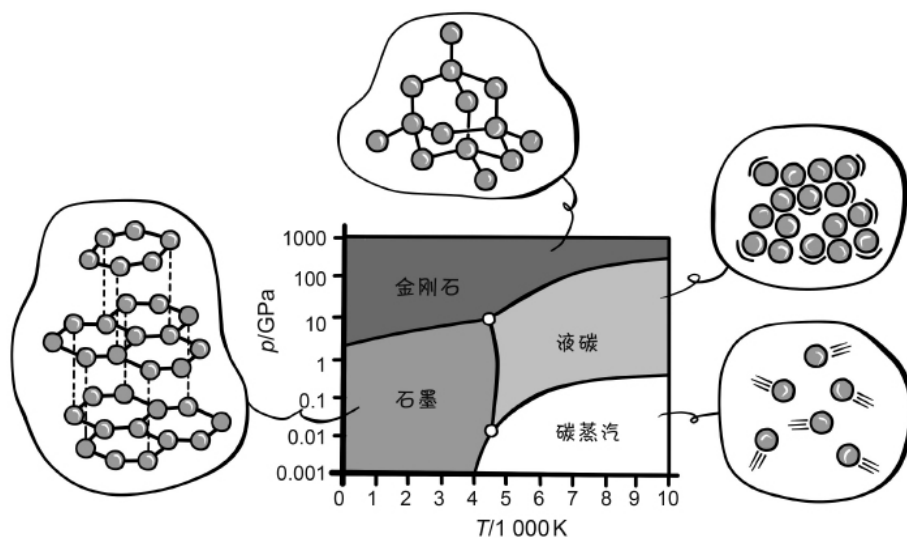
总结一下，一节电池的电动势主要与正负极的电极电势之差有关，电极的电极电势是由电极本身决定的，选定了电极与电解质，电池的电动势也就确定了。



31 如果在无氧环境中利用电流热效应加热碳，碳是否会熔化？

在低气压无氧环境下加热碳，碳会直接升华变成碳蒸汽，但是在加压之后会熔化。这是一个很好的问题，实际上科学家真做过这个实验，还做了不少。2005年有人写了一篇综述总结从1963年到2003年科学家在这个问题上做出的努力。[Measurements of the melting point of graphite and the properties of liquid carbon (a review for 1963-2003)]

从1930年开始就陆续有科学家通过各种手段，如激光、电流来做关于碳的熔化实验。我来解读一下下面的图，最下面的0.001GPa是10个大气压，可以看到标准大气压下在3700°C（0°C=273.15K）左右石墨会直接汽化变成碳蒸汽。随着压强增加到100个大气压左右，石墨会先熔化成液态的碳，熔点在4000°C左右。当大气压增加到10万个大气压左右的时候，石墨会向金刚石转变，石墨就被压成钻石了，熔点依然在4000°C左右。当压强接近1000万个大气压的时候，金刚石就很难熔化了。我们都知道金刚石在真空中加热会变成石墨，证明金刚石也是由碳原子构成的，而金刚石极高的硬度和稳定性都得益于碳原子之间的化学键非常坚固（可以理解为它们之间由很强的胶水粘在一起）。单层石墨的碳原子之间同金刚石一样有着很强的化学键，层间通过范德瓦耳斯力凝聚在一起，所以石墨的熔点也非常高。

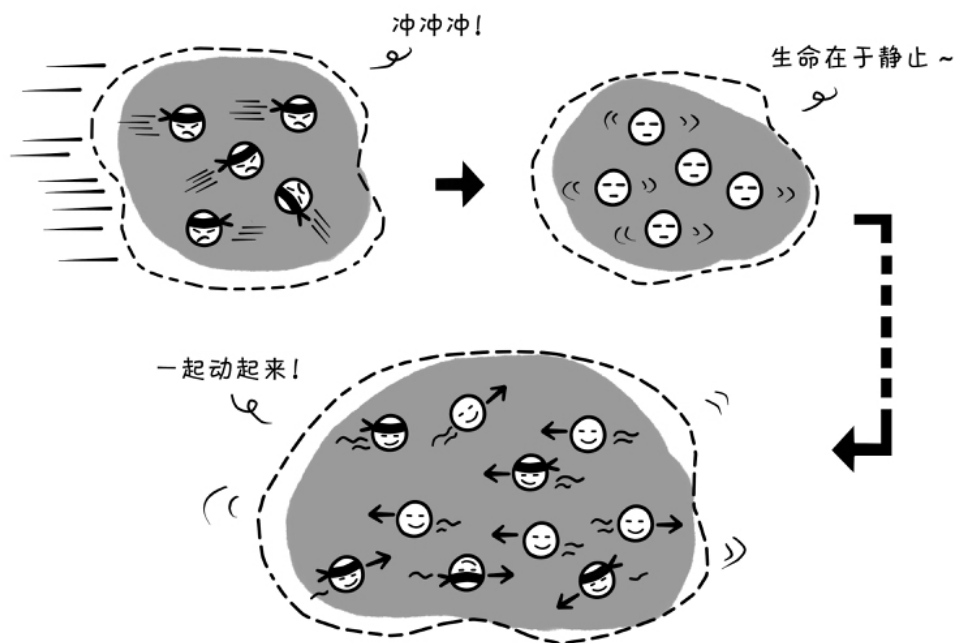




32 请问两物体因接触而产生的热传导，如何用微观粒子来解释和描述？

热量从高温物体向低温物体传递是自然界的基本性质。热传导的微观机制不是用一两句话可以完全说清楚的，但是我们可以通过最简单的简化模型一探究竟。

假设有两个完全一样的小球，一个小球动能大，另一个动能小。把它们丢进一个内壁光滑的盒子里，小球之间只发生弹性碰撞，可以发现在两个小球碰撞过程中，高速小球更倾向于速度变小，低速小球更倾向于速度增大（并不一定会出现这种结果，只是这种情况出现的可能性大），极端情况就是运动的小球和静止的小球相撞，结果一定是静止的变运动，而运动的小球减速。过一段时间再观察，之前速度大的小球的平均动能降低了，速度小的小球的平均动能增加了，也就是说高速小球的能量传递给了低速小球。这对应于宏观中的高温物体向低温物体传递能量。如果只是考察接触传热的话，把运动的小球换成彼此用弹簧连起来的小球就行了。





33 物体表面积变大，热辐射就变大吗？

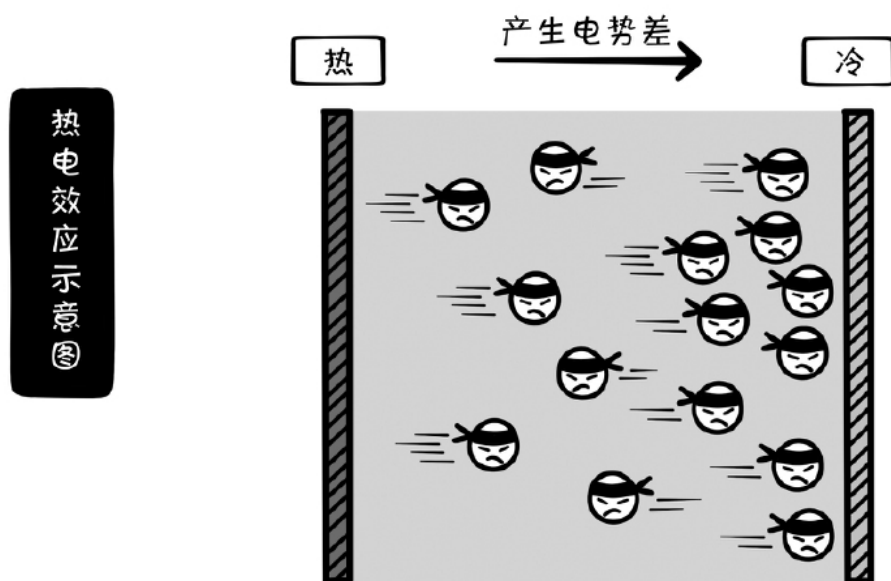
在表面温度、表面状态均不变的情况下，增大物体表面积确实可以增大热辐射功率，而且功率正比于表面积。这个问题很好理解：假设一个表面的辐射功率是 P ，那么再找一个完全一样的表面，那么两个表面总辐射功率显然是 $2P$ 。如果直接把表面的面积扩大到原来的两倍，相当于把两个一样的表面拼接在一起，辐射功率也是 $2P$ 。所以增大表面积，辐射功率会线性增大。



34 热电效应是什么？有什么应用？

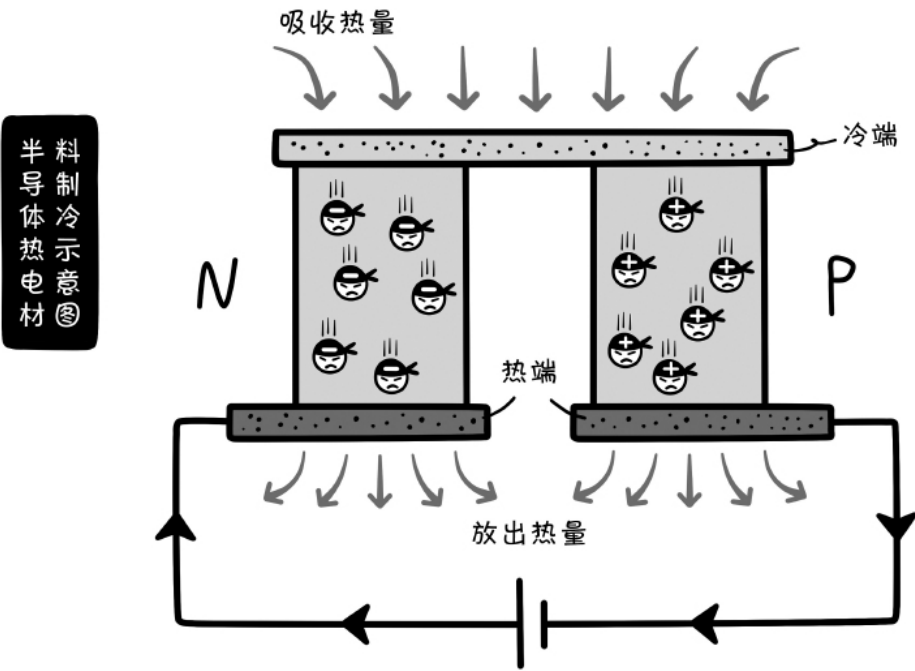
首先，简单说一下什么是热电效应，当金属或者半导体两端有温度差的时候，两端会产生电势差，如果用导线将两端连起来，就可以形成通路。不仅如此，当我们给一个温度分布均匀的金属或半导体两端加上电压以后，也会产生一个热流动，时间长了，两端会产生温度差。前者被称为塞贝克效应，后者被称为帕尔贴效应。但是由于对大部分金属和半导体来说，这个热流的量级远小于电流产热的量级，所以我们几乎感觉不到它的存在。

那为什么会有这么神奇的效应呢？主要原因在于载流子（金属中的电子、半导体中的电子和空穴）在传导的时候会携带热量。当金属或者半导体两端有温度差的时候，热端的载流子扩散速度更快，就会在冷端形成电荷聚集，正是这个电荷聚集导致了电势差。反过来，当给金属或者半导体两端加上一个电压，载流子的单向流动也会导致热流动，从而形成温度差。



说了这么多，热电效应有哪些用处呢？第一个用处就是发电。一些制造业工厂每天都会产生大量的热量，这些热量无法利用就被浪费

掉了，我们可以通过烧水的方式来利用它，但是显然这是非常低效麻烦的。如果我们用热电性能好的材料将其转化为电能，变废为宝，将为节能减排做出重要贡献。第二个用处就是用来测量温度。我们只要恒定温度计其中一端的温度，然后把另一端接触到我们要测温的物体上测量电势差，就可以知道要测的物体的温度啦！其测温范围上至1000℃，下至零下270℃，分辨率还很高，是各大实验室居家必备神器之一。



热电器件还可以用来制冷，上图就是利用半导体热电材料制冷的示意图，我们给两个半导体通电，就会使它们的载流子从冷端向热端移动带走热量，但是这个制冷量非常小，通常用于微型制冷。



35 光是否具有动量？

光具有波粒二象性，既然有粒子性，那么就具有质量、动量的属性。爱因斯坦在光电效应的解释中提出了光量子的概念，认为一个光量子的能量是 $E=h\nu$ 。接下来让我们引用爱因斯坦最广为人知的方程——质能方程 $E=mc^2$ 。

如果这两个方程都是对的（事实证明确实如此），那么用它们来描述同一个光量子，能量 E 应该是相等的，因此有 $mc^2=h\nu$ 。光速等于波长乘以频率，即 $c=\lambda\nu$ 。

在等式 $mc^2=h\nu$ 两边同时除以光速 c 之后，左边的 mc 即为一个光量子的动量，因此一个光子的动量为 h/λ 。



36 光学显微镜分辨率受到可见光波长的限制，那电子显微镜会受到物质波波长的限制吗？

先说一下光学显微镜的分辨率。光学显微镜的分辨率受光波波长的调制，其原因可以用夫琅禾费衍射说明，当光波通过圆孔或狭缝时，会发生衍射现象。比如光在通过圆孔时形成如下图所示的衍射斑点，就是一个模糊的斑点和周围的衍射条纹，而不再是一个绝对的亮点。



在衍射发生时，其衍射斑点的角半径受波长的限制，公式为：

$$\Delta \theta = \frac{\lambda}{a}$$

式中 $\Delta\theta$ 为斑点的角半径， λ 为光波波长。 a 是小孔半径，这是光波的衍射造成的像点的分辨程度的度量，小孔半径在分母上，所以这个

现象只有在小孔半径小于等于光波波长的時候才会比较显著。两个光点之间的距离要大于这个角半径所决定的距离，否则两个亮斑重合在一起无法分辨。在这个限制条件的推导过程中，并没有限制其必须为光波，除了光波，物质波的衍射也符合同样的规律。只要满足波的叠加原理的就会满足这个关系，存在类似的分辨率限制。电子，其性质由态函数描述，而态函数满足薛定谔方程，也能发生衍射。所以其成像的分辨率也会受到电子波波长的限制。只不过电子的物质波波长远小于光子的波长，动能为1eV的电子的德布罗意波长为1.23nm，是1eV的光子波长的1/1000左右，所以其对应的分辨率也高得多。



37 为什么有些金属离子在水中有颜色而有些没有？颜色又是怎么产生的呢？

在水中有颜色的金属离子往往是过渡金属离子。

因为过渡金属有一个未充满的价壳层d轨道，所以过渡金属往往有不只一种氧化态。当过渡金属离子与中性或带负电的配体结合时，它们会形成所谓的过渡金属配合物。配体通过共价键或配位键与中心离子结合。常见配体有水、氯离子和氨。

当一个配合物形成时，因为有些电子更靠近配体，过渡金属离子的d轨道形状会发生变化，这样就会发生d轨道的分裂：一些d轨道进入高能级，而另一些则进入低能级。这样就形成了一个能隙。电子可以吸收光子，从低能级跃迁到高能级。被吸收的光子的波长取决于能隙的大小。（为什么s和p轨道发生分裂时不会产生有色复合物？因为形成的能隙比较宽，吸收的光子处于紫外线区域，肉眼观察不到）

另外，由于过渡金属具有未充满的价壳层d轨道，所以有人将锌、镉、汞排除在过渡金属之外，因它们有充满的价壳层d轨道。根据化学常识我们知道， Zn^{2+} 在水中是无色的，这与其d轨道充满了电子有关。



38 原子中电子从基态到激发态的过程是瞬间移动还是像我们跳楼梯一样有一个跳动的过程？

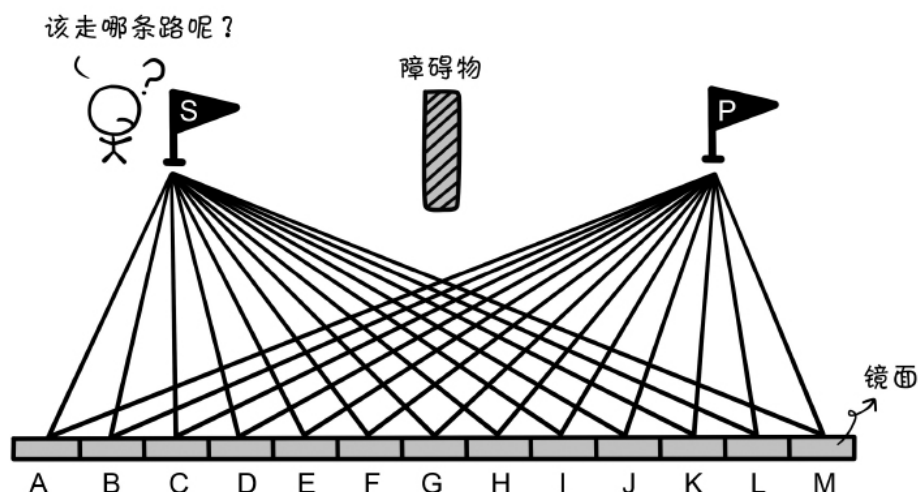
当我们谈论电子跃迁时，我们在谈什么？在量子力学中，我们用波函数描述电子的状态。当一个电子处于基态时，电子波函数就是基态波函数，当电子波函数中渐渐出现激发态的波函数时，我们说电子开始向激发态跃迁。直到电子波函数中的激发态波函数占主导地位时，我们说电子跃迁到了激发态上。

波函数的演化依赖薛定谔方程，它让电子的波函数在时间上连续变化，波函数不发生突变，因此电子跃迁是需要时间的。定性地讲，电子跃迁时间和两个能级的能量差之间满足 $\Delta t \Delta E \sim \hbar$ ，其中 \hbar 是普朗克常量。从氢原子的基态跃迁到第一激发态的时间约为 10^{-16}s ，在人类眼中，把它当作瞬间的过程也没有什么不妥。



39 镜面反射时光走的路程是最短的，光怎么知道它走这条路的路程是最短的？

光没有自由意识，自然不知道自己走的这条路是最短的。实际上，在镜面反射过程中，量子理论认为光其实走了所有可能的路径，每条路径都是平等的。而在几何光学中，光走的路径最短是在经典极限下的描述。



如上图，一个光子经过镜面反射从S到P的过程中，实际上走了各种可能的路径，每种路径贡献一个概率幅（相当于一个复数），从S到P的概率是所有这些不同路径给出的概率幅叠加的结果。但不同的路径因为路程不同，所以光子走的时间并不相同，于是相邻的路径贡献的概率幅实际上会有不同的相位。如果路程不是最短的，较小的路径移动就会带来比较长的路程差，那么相邻的路径之间的时间差就会比较明显（如图中的SAP、SBP两条路径），这样，它们之间就会发生比较明显的相消干涉从而其贡献相互抵消。而对于SGP这种路程最短的线，它的微小移动不会带来比较明显的相位差别，因此这部分的概率幅就会被保留并成为主要的贡献者。所以从实际的效果来看，就等于光走了最短路程的线。

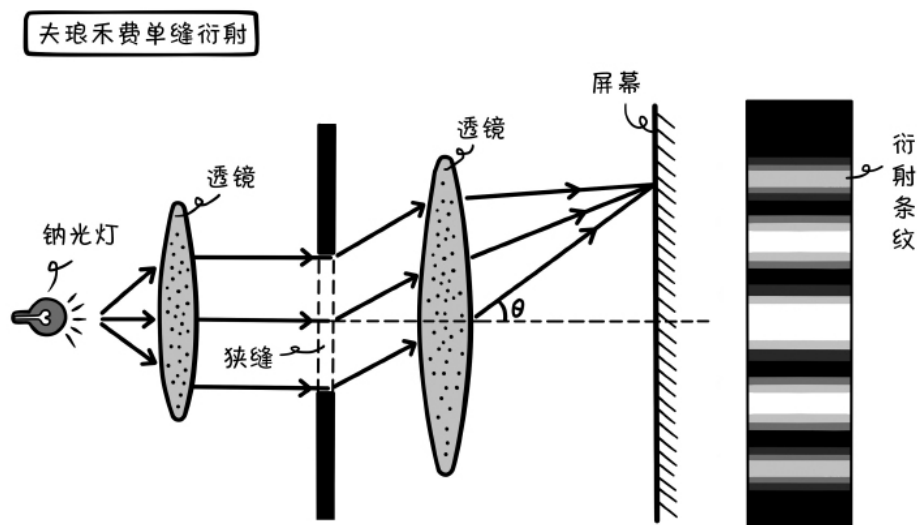
著名的物理学家理查德·费恩曼就是通过对这个问题的深入思考，提出了著名的路径积分理论。路径积分理论现在已成为理论物理的一块基石。



40 用逐渐减小狭缝宽度的方法能否使穿过狭缝的一束光不断地变窄？

当狭缝很宽的时候，减小狭缝的宽度确实可以让穿过光束不断变窄；但是当狭缝的宽度窄到与光的波长相当时，情况就不一样了，此时光在通过狭缝时会发生衍射。光的衍射可分为两类：一类为菲涅耳衍射，又称近场衍射；另一类为夫琅禾费衍射，又称远场衍射。对于菲涅耳衍射来说，可以借助惠更斯-菲涅耳原理来简单地说一下，该原理的表述为：在光场中任取一个包围光源的闭合曲面 Σ ，该表面上的每一点均是新的次波源，观察点 P 的振动是曲面 Σ 上所有次波源发出的次波的相干叠加。当一个点光源在通过狭缝时，其波面会被挡住一部分，但没有被挡住的那部分仍能够作为波源再发射次波，而发射出的次波是球面波，因此最终投在屏幕上的宽度就比狭缝宽。

对于夫琅禾费单缝衍射来说，衍射光经透镜汇聚后会在屏幕上形成明暗相间的条纹。



条纹特点是最中央是一条特别明亮的亮条纹，然后两侧分布着明暗相间、亮度较小的条纹。

中央最亮的条纹的半角为 θ ， θ 的大小与狭缝宽度 D 成反比，即 $\theta = \lambda/D$ 。从公式可以看出，如果狭缝越窄，则形成的亮条纹越宽。

需要注意的是，衍射现象只有在障碍的尺度与波长相当时比较明显，另外，由于生活中很多光源并不是单色光，因此各衍射图案混合在一起就会变得不可分辨。

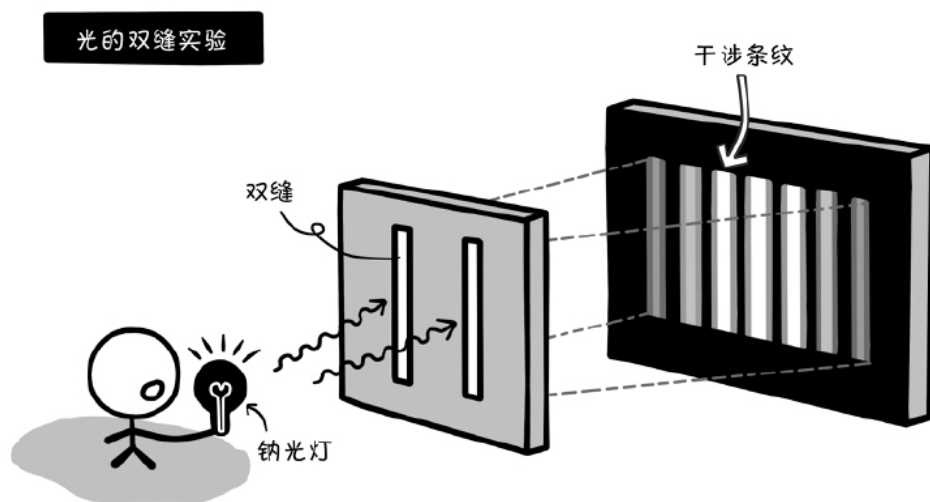
41 在做电子衍射实验时，为什么要对电子进行高压加速？如果电子能静止，波长会无限大吗？

物质波发生衍射的条件和光波发生衍射的条件是一致的，其中一个很重要的条件是波长与狭缝宽度或障碍物的尺度相近。在做电子衍射实验时，我们通常需要利用电子衍射来观测特定的物质的微观结构，我们需要使电子波长与待测物质微观结构特征尺寸一致，因此需要对电子进行高压加速以得到某种特定波长的电子，同时我们还要保证电子能够源源不断地打到待测样品上，因此也需要利用电场加速对电子的运动方向进行控制。

对于第二个问题，根据热力学第三定律，绝对零度无法达到，电子是不能够绝对静止的。



42 请问双缝实验是为了探究什么？



想象这样一个场景，你的面前有一堵铜墙铁壁，在墙上有两道互相平行的狭缝，而在墙的后边则是一面“沙墙”，无论什么东西打到它上边都会被“吸收”。此时你拿着一把机关枪对着双缝射击，那么子弹将有一定概率从缝中穿过去打到后边的墙上。随着射入子弹数量的增多，墙所吸收的子弹也将越来越多。假设这把枪枪口经常跑偏、瞄得不怎么准，因此你打出去的子弹可能会往各种方向偏离，再加上子弹在通过狭缝的时候可能会发生偏折，故而墙后边的子弹并不会聚集于一个点，而是有一定的分布。

分别关闭其中一个狭缝，而对着另一个狭缝射击，得到两组子弹分布的数据 P_1 与 P_2 ，然后将两个狭缝全部打开，同时对着两个狭缝射击会得到子弹分布的数据 P 。我们发现 $P = P_1 + P_2$ 。

接下来我们把实验变一下。在S处有一个电光源，光源右侧有一面不透光的墙，在墙上有两个狭缝分别位于 S_1 和 S_2 的位置，在这面墙后边还有一面墙。

关闭 S_2 狭缝，让光只从 S_1 狭缝通过，可以得到墙上的光强分布 I_1 。然后，关闭 S_1 狭缝，让光只从 S_2 狭缝通过，可以得到墙上的光强

分布 I_2 。

最后，将两个狭缝同时打开，让光同时从两个狭缝通过，在墙上还会得到光强分布 I ，此时 $I=I_1+I_2$ 吗？

答案是不等于！

从 S_1 和 S_2 射过的光都是来自 S 处的，且从 S 到 S_1 和 S_2 的距离相等，因此 S_1 和 S_2 处的光我们可以认为它们是“相同的”。对于接收墙上的不同位置，即两束光交汇于不同位置时，各自走的光程不一样。

如果光具有波动性，则光程不一样，对应的相位也不一样。因此将两束光加在一起，光强并不是简单地相加，还额外有了一个干涉项。这一干涉项的大小与两束光的相位差有关，其不仅有正值还有负值。当取正值时，合光强比两束光的光强直接相加要强；而取负值时，合光强为0。因此墙上的光强会随着位置的变化而变化，有明有暗，并且具有一定的规律性，即明暗相间的条纹。

因此，如果光的双缝实验结果是明亮相间的条纹，那么便证明光具有波动性。

双缝实验可以验证波动性，不仅是光，电子也可以。关于电子的双缝实验非常经典，感兴趣的读者可以参考《费恩曼物理学讲义·第三卷》。



43 微观的自旋是怎么提出的？该如何理解？

1925年，G.E.乌伦贝克和S.A.古兹密特受到泡利不相容原理的启发，分析原子光谱的一些实验结果，提出电子具有内禀自由度——自旋，并且有与电子自旋相联系的自旋磁矩。

事实上，早在他们之前，一名叫Kronig的年轻人就提出了电子自旋的假定，但由于泡利的反对，没有发表自己的成果。（泡利，学术界的“上帝之鞭”，怼过许多人，很少失手）

电子的自旋并不是绕自身轴转动引起的，它与空间的运动没有任何关系，因此也不能用坐标变量来描述。电子自旋及相应的磁矩是电子本身的内禀属性，这是电子的一个新的自由度。因此描述电子需要4个量子数，即 n 、 l 、 m 、 s 。

证明电子具有自旋的实验很多，如著名的Stern-Gerlach实验。

更进一步，狄拉克发现，电子自旋是一种相对论效应，系统的理论需要用到相对论量子理论，在这里我们就不深入讨论了。微观粒子都有自旋，自旋为 $\hbar/2\pi$ 偶数倍的粒子为玻色子，为奇数倍的则为费米子，如果是费米子则波函数对于两个粒子是交换反对称的，因此不可能有两个粒子和费米子处于同一个单粒子态，这便是泡利不相容原理。



44 量子力学在实际生活中有哪些应用？

量子力学看起来很违背常识，高深莫测，但是生活中量子力学无处不在，毫不夸张地说，如果没有量子力学就没有今天的生活。下面列举一些典型的例子。

1. 激光：激光器中的电子受激发跃迁到高能级，高能级的电子在特定光的影响下会集体向低能级跃迁并释放大量光子，从而实现光放大。激光具有高亮度、高方向性和高相干性的特点，在实际生活中有大量应用。

2. 磁共振成像：磁共振成像利用磁共振来确定物体内部原子核的位置和状态，从而绘制物体内部的结构，在物理、化学和医学中都有大量应用。

3. 太阳能电池：太阳能电池可以将太阳能转化成电能来获得清洁能源，太阳能电池可以被看作一个PN结，当光照在太阳能电池上时会产生电荷-空穴对，在PN结内建电场的作用下电子和空穴会分离开，这样当外部电路接通后就会产生电流。

4. 计算机：计算机强大的威力众所周知，它的核心部件是晶体管，而晶体管自身要用到大量半导体材料。对半导体材料性质的研究必须要用到量子力学，不然我们无法区分绝缘体、导体和半导体。

以上所列只是量子力学应用中的冰山一角，有兴趣的读者可以查阅更多资料。

致谢

本书要感谢中科院物理所“问答”栏目背后的问答团队，该团队主要由物理所的研究生组成，包括程嵩、李治林、张圣杰、薛健、姜畅、吴定松、葛自勇、陈晓冰、樊秦凯、陈龙、纪宇、刘新豹、王恩、王文轲、李裕、胡史奇、王梦凡、徐越山、徐成谦等。感谢诸位的贡献！

除了所内的研究生，“问答”专栏还有幸得到来自所外的问答志愿者的参与，他们有中科院国家天文台的何川、郭潇，中科院理论物理所的安宇森，清华大学物理系的袁子等。感谢你们的支持！

最后，我们在这里同样向广大的提问者致以诚挚的谢意！爱因斯坦曾经说过：“提出一个问题往往比解决问题更重要。因为解决问题也许仅是一个数学上或实验上的技能而已，而提出新的问题，却需要创造性的想象力，而且标志着科学的真正进步。”事实上很多读者提出的问题正是曾经推动我们科学进步的重要问题，也正是大家的提问给了我们这本书最强大的原动力，感谢你们！同时我们期待更多的读者提出更多的问题，也期待更多的小伙伴加入我们的问答团队。



未读 Club

为读者提供有温度、有质量、有趣味的
泛阅读服务



专属社群 独家福利
精品共读 活动特权

手机扫码
加入未读 Club 会员计划

改变物理学的 50个实验

【英】亚当·哈特·戴维斯——
Adam Hart-Davis——
阳曦——译

薛定谔的猫

SCHRODINGER'S CAT

Groundbreaking Experiments in Science

「未读·探索家」·科学的转折书系·

北京联合出版公司
Beijing United Publishing Co., Ltd.



版权信息

薛定谔的猫

Schrodinger's Cat

作者：[美] 亚当·哈特-戴维斯 (Adam Hart-Davis)

译者：阳曦

出品方：未读·探索家

出版社：北京联合出版公司

Copyright © Elwin Street Limited 2015

14 Clerkenwell Green, London EC1R 0DP, United Kingdom

Interior design and illustrations: Jason Anscomb, Rawshock design

Photo credits: Shutterstock.com,

Simplified Chinese edition copyright: 2017 United Sky (Beijing)
New Media Co., Ltd.

All rights reserved.

目 录

引言

1. 早期实验：公元前430—1307

约公元前430 空气算是“物质”吗？——恩培多克勒

约公元前240 浴盆里的水为什么会溢出来？——阿基米德

约公元前230 如何测量地球？——埃拉托斯特尼

1021 光是怎样传播的？——海什木

1307 彩虹的颜色从哪儿来？——弗莱贝格的狄奥多里克

2. 启蒙时代：1308—1760

1581 磁北极在哪里？——诺曼

1587 大球和小球：谁坠落的速度更快？——伽利略

1648 山顶上的空气更稀薄吗？——帕斯卡

1660 轮胎为什么要充气？——波义耳

1672 “白色”是一种颜色吗？——牛顿

1676 光速是有限的吗？——罗默

1687 “苹果砸头”的故事是真的吗？——牛顿

1760 冰是……热的？——布莱克

3. 更广阔的领域：1761—1850

1774 你能称出这个世界的质量吗？——马斯基林

1798 你能（不借助山峰）称出这个世界的质量吗？——卡文迪许

1799 电池是如何发明的？——伏特

1803 光会互相干涉吗？——杨

1820 磁能产生电吗？——奥斯特和法拉第

1842 声音能拉伸吗？——多普勒

1843 让水变热需要多少能量？——焦耳

1850 光在水里会变快吗？——斐索与傅科

4. 光、射线和原子：1851—1914

1887 什么是以太？——迈克尔逊与莫立

1895 X射线是怎样被发现的？——伦琴和贝克勒尔

1897 原子里面有什么？——汤姆森

1898 镭是怎样被发现的？——居里与居里夫人

1899 能量能在空间中传播吗？——特斯拉

1905 光速是恒定的吗？——爱因斯坦

1908—1913 世界为何大部分是空的？——卢瑟福等人

1911 金属在绝对零度下会表现出什么特性？——昂内斯

1911 把头探进云里就能获得诺贝尔奖？——威尔逊

1913 如何测量粒子携带的电荷？——密立根与弗莱彻

1914 量子力学比我们想象的还要古怪吗？——弗兰克与赫兹

5. 物质深处：1915—1939

1915 引力与加速度有关吗？——爱因斯坦

1919 你能把铅变成金子吗？——卢瑟福

1919 爱因斯坦的理论能被证实吗？——爱丁顿等人

1922 粒子会旋转吗？——施特恩与格拉赫

1923—1927 粒子会波动吗？——戴维森与革末

1927 一切都是不确定的？——海森堡

1927—1929 宇宙为什么会膨胀？——弗里德曼

1932 反物质真的存在吗？——安德森

1933 引力如何构建银河系？——兹威基

1935 薛定谔的猫是死还是活？——薛定谔

1939 怎样利用核物理知识造出原子弹？——西拉德与费米

6. 跨越宇宙：1940—2009

[1956 一颗恒星诞生了？——塔姆等人](#)

[1965 大爆炸留下了余韵吗？——彭齐亚斯与威尔逊](#)

[1967 小绿人真的存在吗？——贝尔](#)

[1998 宇宙正在加速膨胀吗？——珀尔马特](#)

[1999 我们为什么会在这里？——里斯等人](#)

[2007 我们是宇宙中唯一的智慧生物吗？——波勒等人](#)

[2009 我们能找到希格斯玻色子吗？——希格斯等人](#)

[索引](#)

[词汇表](#)

[致谢](#)

[返回总目录](#)

引言



物理学拥有漫长的历史，事实上，它可能是最古老的科学。人类总是好奇地想弄清事物运行的规律，于是有的人不辞辛劳，开始努力探索大自然的秘密。在那遥远的过去，一定曾有无数原始人坐在夜幕下，仰望头顶璀璨的星月，猜测它们运行的规律。每种文化都有独特的创世神话和无数有关天空的传说，但物理学却另辟蹊径，试图运用逻辑推理和实验揭开世界的真相。

天文学总是走在科学的最前沿，你可以用裸眼观察星空，列出星星的名字，为它们编制星图，记录行星神秘的运行轨迹，还有偶尔出没的流星、彗星和超新星。1600年左右，望远镜的出现让天文学迈上了新的台阶，但天文学家不做实验，所以这本书里很少提到他们的名字。

从恩培多克勒的漏壶实验到阿基米德的浴盆顿悟，中间隔了差不多两百年。在这段时间里，人类的计算能力和理解能力都有了巨大的进步。希腊文明衰落后，科学曾一度裹足不前，直到伊斯兰黄金时代的曙光初现，众多阿拉伯科学家、工程师和炼金术士为科学揭开了新

的篇章。不过随之而来的是又一次的蛰伏期，直到1543年，哥白尼提出石破天惊的日心说，67年后，观察到木星卫星的伽利略义无反顾地加入了拥护他的阵营。

伽利略做了一系列突破性的实验，在他之后，罗伯特·波义耳和艾萨克·牛顿为化学和物理学奠定了坚实的基础。依靠新的理论和实验技术，科学家开始测量音速、光速和地球质量，并试图研究翅膀的流体力学特性。在这个时期，欧洲是物理学研究的中心，德国更是天才云集的重镇，不过美国人很快迎头赶上，独占鳌头，这样的局面一直延续到了今天。



19世纪末，物理学领域涌现出一批惊人的发现——短短五年内，科学家先后发现了X射线、放射性和电子，新的想法和理论应运而生，在此基础之上，人们又设计了进一步的实验；20世纪初，我们对物质特性的理解突飞猛进。

两次世界大战迫使研究者将工作重点转向军事领域，由此创造出雷达、微波和环磁机，最重要的是，我们开始试着利用核能。二战结束后，基础科学再次蓬勃发展，尤其是在天文学、天体物理和宇宙学领域，科学家开始更加深入地研究宇宙的性质。我们将望远镜送上了太空，那里没有干扰视野的大气；与此同时，我们拥有的计算能力也

在飞速增长，根据摩尔定律，高密度集成电路上镶嵌的晶体管数量每两年就会增长一倍，所以电脑的计算能力也遵循同样的发展规律。

21世纪，我们迎来了大科学的时代，许多前所未有的大型昂贵实验纷纷启动，某些实验由数千名物理学家共同参与，为了分析这些实验产生的海量数据，他们动用了多台超级计算机。

即使付出了这么多努力，但我们离物理学的尽头依然非常遥远。无论做了多少实验，每个实验总会带来新的问题，等待我们去一一解答。



1. 早期实验：公元前430—1307

古代的中国人是伟大的发明家，磁性罗盘、火药、纸、印刷术都出自他们手中，张衡的地动仪更是能探测到远方的地震。除此以外，古中国的天文学家也相当出色，早在1054年，他们就曾观测到超新星爆发。

相比之下，古希腊人对通用科学更感兴趣，亚里士多德是其中的佼佼者，他撰写的著作涵盖了物理学、生物学、动物学及其他诸多科学领域。亚里士多德侧重于理论研究，但恩培多克勒（他出生的年代比亚里士多德还要早得多）、阿基米德和埃拉托斯特尼却做过一些简单优雅的实验。

不过，要说最早的真正的科学家，恐怕还得数11世纪的阿拉伯人海什木。他从埃及的哈里发手下死里逃生后，做了一系列巧妙的光学实验来研究光的特性，并撰写了一本光学专著。最后，弗莱贝格的狄奥多里克通过实验分析彩虹的特性，得到了正确的结果，但他的初衷却与此南辕北辙。

约公元前430年

研究人员：

恩培多克勒

研究领域：

气体学

结论：

空气是一种物质

空气算是“物质”吗？

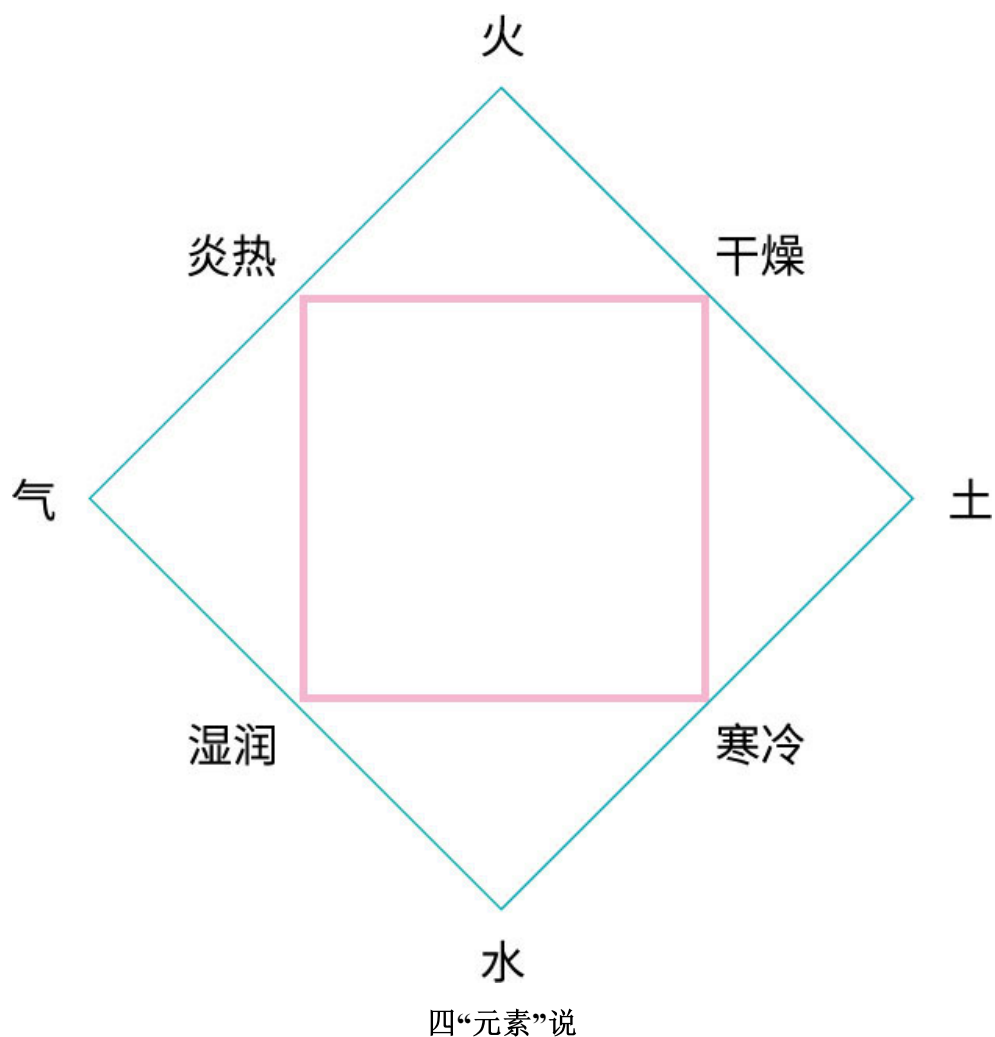
恩培多克勒探索万物的根源

阿格里真托镇位于西西里岛的西南海岸线中央，这里矗立着一座座美丽的希腊神庙遗迹，它们傲然耸立在高高的山脊上，沐浴着地中海明媚的阳光。镇里还有一座宏伟的露天竞技场，公元前5世纪，希腊哲学家恩培多克勒就生活在这里。为了证明四元素理论，恩培多克勒曾做过一系列实验，这是世界上已知最早的科学实验。

四元素说

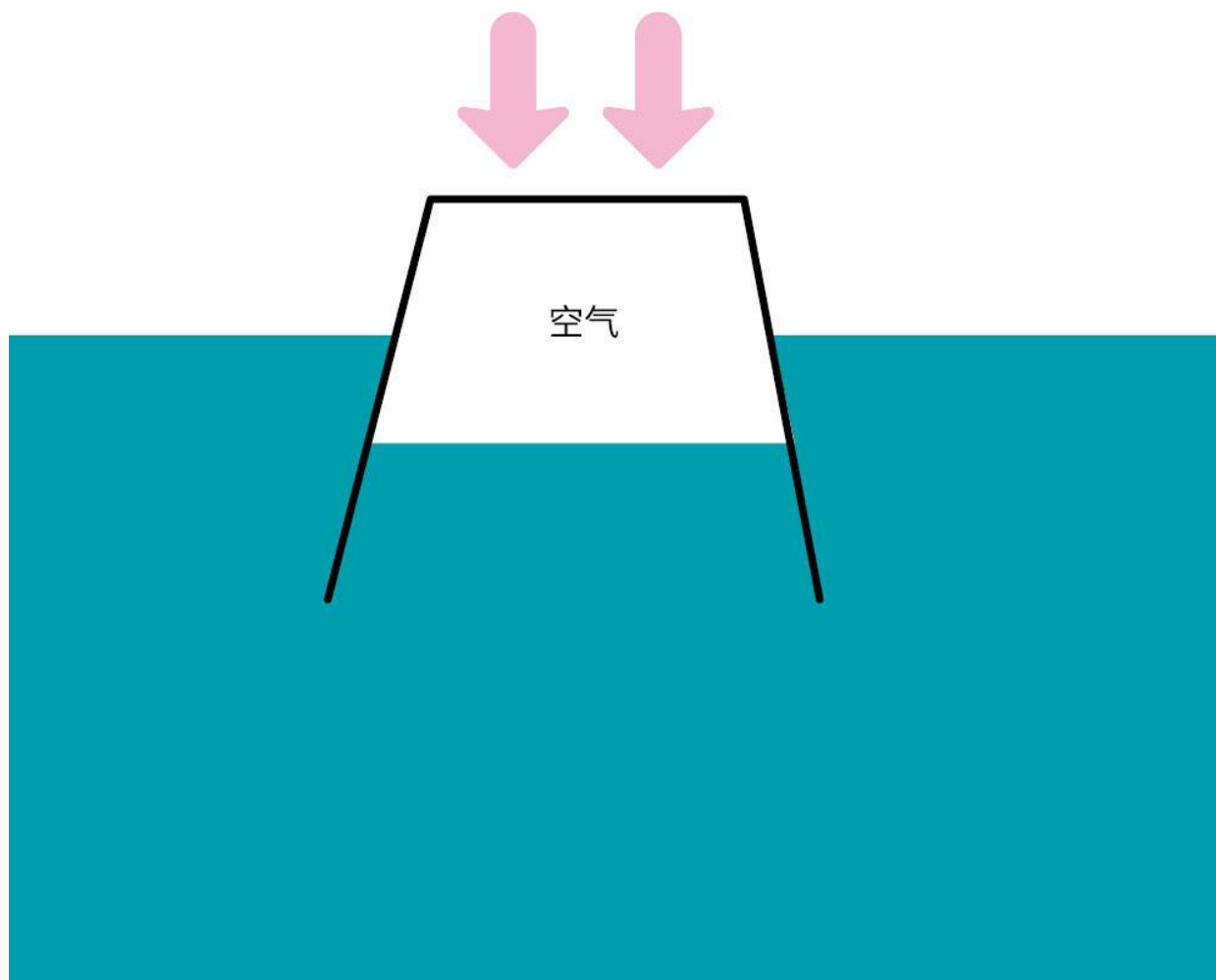
-

数百年来，人类一直在探索世界的本源，并为此争论不休。泰勒斯认为水是万物之母，因为水既能凝结成冰，又能蒸发为气，所以它或许可以变幻成任何东西。其他人也曾提出过物质是由某些基本元素组成的。恩培多克勒宣称，一切物质都来自四种基本元素（或者说“根”）的组合，它们分别是土、气、火和水。他说，每种元素都希望回到自己原来所属的位置，所以土必然下沉，水流奔向大海，水里的气泡总会上升，火总是向着太阳升腾。



这些元素恒久不变，爱将它们结合在一起，但总有纷扰会将它们拆开，这才有了万物的变化和流转。

不过这套理论也有一个问题，因为一些反对者提出，气不可能是一种元素：空气看不见也摸不着，什么都不是，所以它无法组成物质，更不能成为万物的根源。恩培多克勒指出，水里的气泡会上升，你能够看见那些气泡，它一定是某种物质。但批评者仍然不服，所以恩培多克勒设计了一个巧妙的实验——“淹没的水钟”。



当时的人们用漏壶来计时，陶壶的底部有一个孔，水可以从里面流出来。恩培多克勒堵上壶底的小孔，把漏壶倒扣过来按进海里，海水完全淹没了陶壶；等他把壶从水里拿出来时，陶壶的内底完全是干的，所以一定有什么东西把水挡在了外面。壶里只有空气，那么空气自然是一种物质，并非“什么都不是”。

土、气、水、火的四元素说流传甚广，直到两千多年后，罗伯特·波义耳重新定义了元素的概念，这才真正动摇了这套学说。

壮烈的结局

恩培多克勒相信自己能够永生不朽，为了证明这一点，他率领追随者登上了西西里岛最东边的埃特纳火山。这是一座活火山，据说恩培多克勒直接跳进了冒烟的火山口。

有传说称，他的一只便鞋从火山口里喷了出来，但从那以后，再也没有人见过恩培多克勒。他的壮举听起来似乎不太明智，但他的名字却因此流传至今，所以，这也许真是成就不朽的好办法。



约公元前**240**年

研究人员：

阿基米德

研究领域：

流体静力学

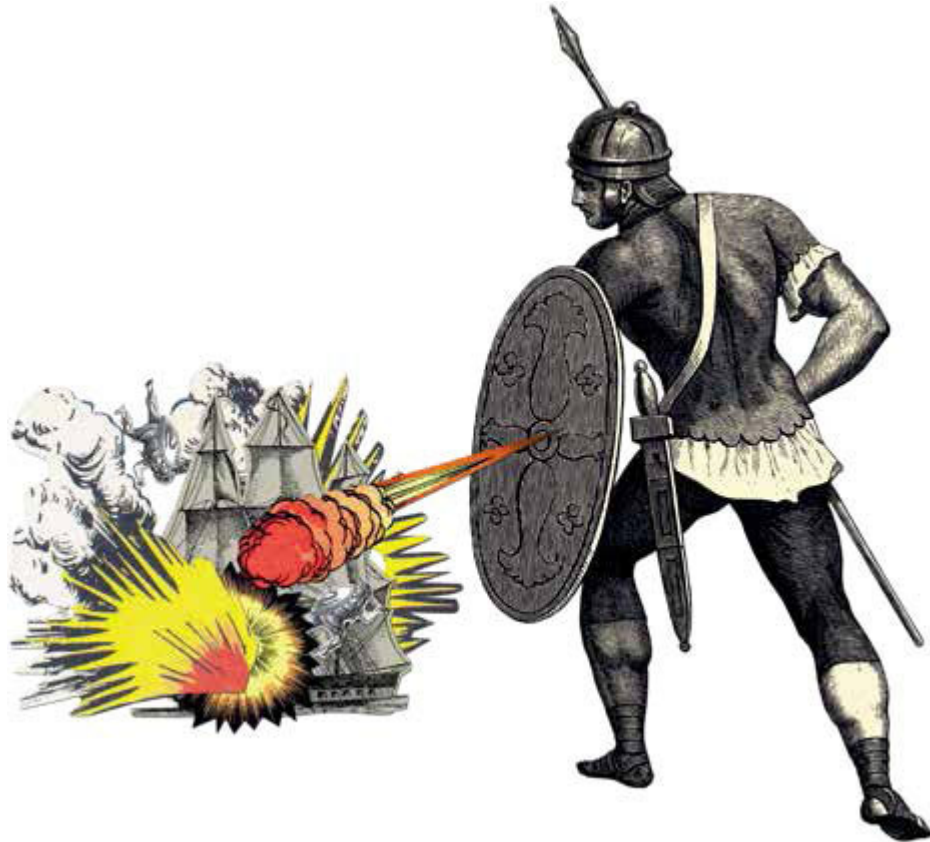
结论：

发现浮力

浴盆里的水为什么会溢出来？

阿基米德的灵光一闪

公元前287年左右，阿基米德出生在西西里岛的叙拉古；公元前212年，这座古城被罗马攻陷，阿基米德死于战火之中。阿基米德是古代最杰出的数学家，他最引以为傲的成就是证明了如果一个球正好能放进一个圆柱体里，就像橘子放进罐头，那么这个球的体积和表面积分别是圆柱容积和表面积的 $\frac{2}{3}$ 。要知道，那个年代根本没有我们今天耳熟能详的定理和方程。阿基米德要求后人在他的墓碑上刻一幅球放在圆柱里的示意图，137年后，罗马演说家西塞罗正好发现了这块墓碑。



战争机器

-

阿基米德是一位娴熟的工程师。公元前212年，罗马军队兵临城下时，他制造了各种各样的防御器械，其中包括投石机和起重机（可以把敌人船只的一头从水里吊起来，让船沉进水里），甚至还有一种“死亡射线”：他指挥大批士兵把闪亮的盾牌举到某个特定的角度，反射阳光烧毁来犯的敌船。

阿基米德还发现了杠杆和滑轮的原理，他曾利用一系列滑轮组成的装置搬运一艘满载的大船，你应该听过他的这句名言：“给我一个支点和一根足够长的杠杆，我就能撬动整个地球。”

可疑的王冠

-

不过，阿基米德最伟大的成就是帮助国王鉴定王冠。暴君希伦二世命令皇家工匠用一块金子为他制造一顶新的王冠，金子的重量大约是2磅（1千克左右）。可是金光闪闪的王冠造好以后，国王却怀疑工匠偷工减料，用等重量的白银换掉了一部分金子。王冠的重量还是2磅，可它真是纯金的吗？希伦派人去见阿基米德，请他解决这个问题。这个任务确实有点困难。王冠非常精美，国王不允许阿基米德对它进行任何破坏。阿基米德冥思苦想，可是一直没有找到答案。有一天，他难得地决定去城里的公共澡堂洗个澡。

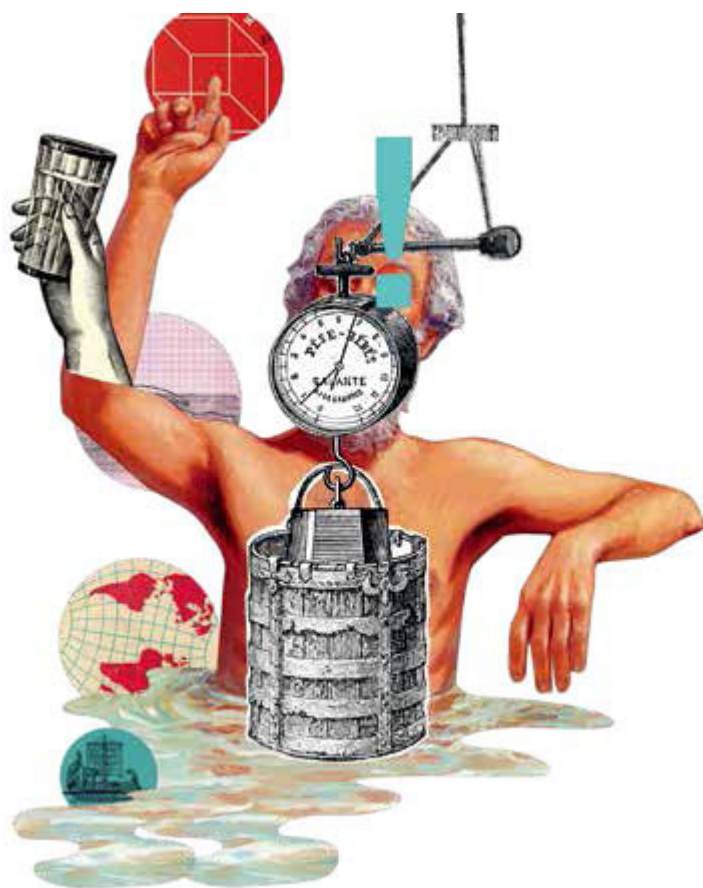


洗了个非常重要的澡

-

阿基米德走进浴盆的时候，他注意到了两件事：第一，他的身体浸入水里以后，浴盆里的水位上升了一点，还有一部分水从浴盆边缘溢了出去。第二，他感觉自己的身体很轻，像是漂了起来。就在这时

候，他灵光一闪——有传说称，阿基米德从浴盆里一跃而起，大喊一声“Eureka!”（意思是“我发现了”或者“我知道答案了”），然后赤身裸体地跑回了家里。



阿基米德的两个发现都很重要：

1. 身体浸入水里时会排开一部分水——因为这部分水的位置被占据了。
2. 浸在水里的任何物体都会感觉变轻，因为它受到了向上的浮力，浮力的大小等于它排开的水的重量。今天我们称之为“阿基米德定律”。

按照这套理论，阿基米德可以把王冠浸没在一个装满水的桶里，根据溢出来的水的重量，就能算出王冠的体积，用王冠的重量除以体积，最终得到它的密度。

阿基米德知道，2磅纯金的体积是3.17立方英寸（约52毫升），如果王冠里面掺了银，那么它排开的水体积应该大于52毫升，因为银的密度比金小——所以同质量的银体积大于金。

运用阿基米德定律

-

不过，准确测量体积相当困难，所以阿基米德可能运用了浮力定律。他从国王那里借来了2磅黄金，把王冠和金块分别放在天平的两头：天平保持平衡，说明二者重量相等。然后，阿基米德把整套装置都放进了水里。如果王冠不是纯金的，那么它排开的水体积应该大于52毫升，因此它会受到更大的浮力，因为浮力由体积决定。所以，水里的天平放着王冠的那头应该会上翘。

结果不出所料，放着王冠的天平托盘果然往上翘了。工匠的确掺了假，最终他遭到了严厉的惩罚。

阿基米德撰写了多本著作，有一部分留存至今，其中包括《论球与圆柱》《论浮体》和《数沙者》。在最后这本著作中，他提出了一个问题：要填满整个宇宙，需要多少粒沙子？为了计算这么庞大的数目，阿基米德发明了一整套新的数字。

约公元前**230**年

研究人员：

埃拉托斯特尼

研究领域：

几何学

结论：

地球的周长是25000英里（约40000千米）

如何测量地球？

太阳、影子和早期的希腊几何学

希腊城市亚历山大位于埃及的尼罗河口，公元前322年，亚历山大大帝主持修建了这座雄城。亚历山大港附近有一座名叫法罗斯的小岛，为了保护港口里的船只，大帝修建了一道从港口直通法罗斯岛的防波堤。他说，这里应该有一座伟大的灯塔，于是法罗斯岛灯塔拔地而起，成为古代世界的七大奇迹之一。

公元前3世纪，亚历山大成了希腊世界的文化中心，城里的大图书馆收藏了数十万卷羊皮纸或牛皮纸的手稿。大约在公元前240年，埃拉托斯特尼被任命为大图书馆馆长。作为一位数学家，他设计了一种寻找质数的方法，后来我们称之为“埃拉托斯特尼筛法”。

质数

-

如果你想寻找2~50之间的所有质数（一般来说，1不算是质数），只需要把它们全都写下来，然后画掉所有大于2的偶数，因为这些数都可以被2整除；然后画掉所有大于3且能被3整除的数，再按照同样的方法处理能被5和7整除的数，最后得到的就是50以内的所有质数：2、3、5、7、11、13、17、19、23、29、31、37、41、43和47。

丈量世界

-

埃拉托斯特尼也是一位地理学家，事实上，他可能是古代世界最优秀的地理学家之一。古希腊人知道地球是圆的，他们已经找到了两个可靠的证据。第一，从港口出发的船舶总会慢慢消失在海天交界的地方，最先从视野中消失的是船身，然后才是桅杆。显然，你看不见它，不仅仅是因为远方的船变得越来越小——实际上，它“沉”到了海平线下方，这意味着地球是圆的。第二，他们发现，月食是因为月亮被地球的影子遮住了，而月面上的影子边缘是一道弧线。



既然知道了地球是圆的，埃拉托斯特尼就想弄清它到底有多大。亚历山大以南500英里（约800千米）的赛尼城（今阿斯旺）位于尼罗河岸边，河道内的象岛上有一口井。埃拉托斯特尼知道，盛夏的正午，任何人都能在这口井的井底看见太阳投下的倒影，这意味着阳光的角度正好与井口垂直。今天，这口古井仍留在原地，可惜的是，井水已经干了，而且井里满是碎石，再也看不见太阳的倒影。





测量太阳的角度

-

埃拉托斯特尼回到亚历山大，将一根棍子垂直地插在地上。盛夏的正午时分，太阳的角度——或者说棍子与它投下的影子顶点之间的角度——是7.2度，即下一页示意图中的角度A。

角度A等于角度A*，因为它们分别位于两条平行线之间的斜线两侧。A*是地心与亚历山大和赛尼城的两根连线之间的角度。接下来的计算就很简单了：

亚历山大与赛尼城之间的夹角=7.2度

亚历山大到赛尼城的距离=500英里（约800千米）

地球圆周角=360度=50×7.2度

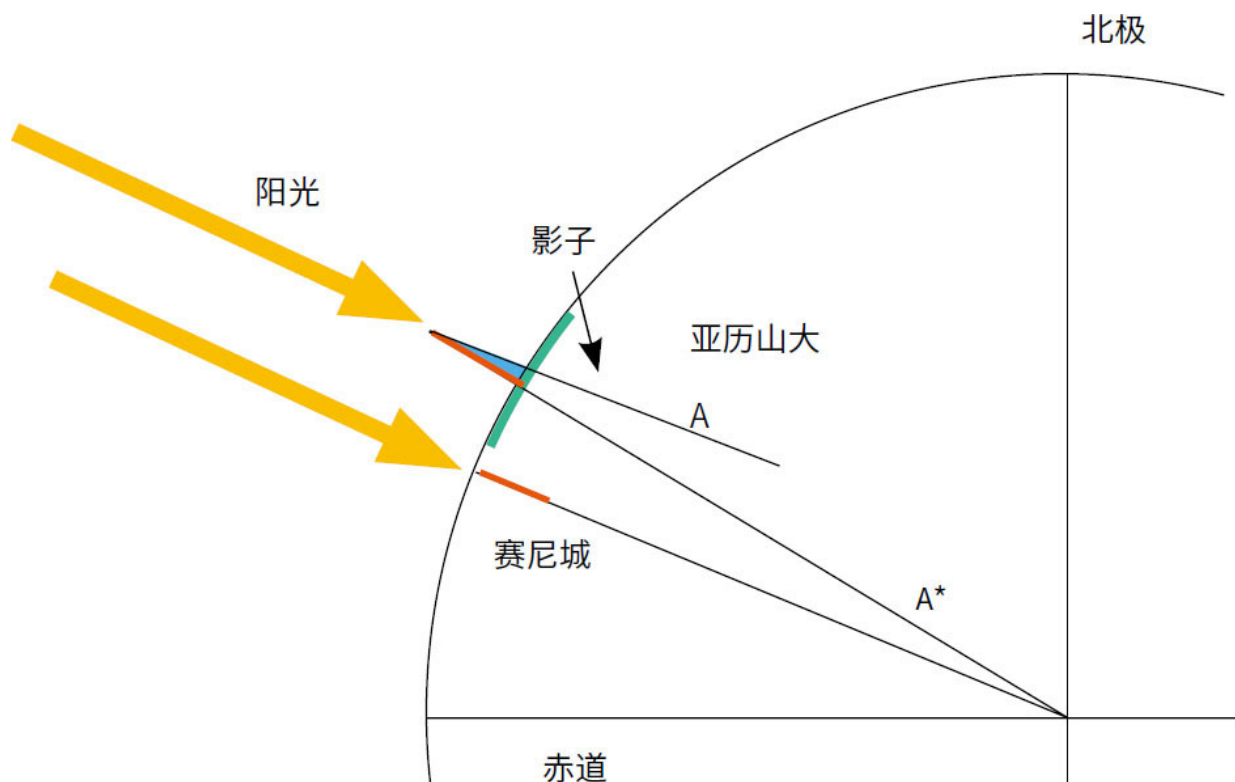
因此，地球周长=50×500=25000英里（约40000千米）

亚历山大与赛尼城之间的距离数据来自官方的步量师（这些测量员接受过专门的训练，他们迈出的每一步距离相等，所以只要数一数走了多少步，就能算出两地之间的距离），所以埃拉托斯特尼最终得出的地球周长单位是“视距”，而不是英里。我们不知道这个单位的精

确长度，但能够确定的是，埃拉托斯特尼估算的地球周长和今天我们测得的24900英里（约40073千米）相差无几。

埃拉托斯特尼和阿基米德过从甚密，虽然阿基米德比他大了十多岁。阿基米德曾离开西西里，远赴埃及去拜访这位好友，而且他很可能在那里发明了阿基米德式螺旋抽水机。直到今天，埃及人还在使用这种水泵从尼罗河里抽水灌溉田地。

后来阿基米德还给埃拉托斯特尼寄过明信片（或者说是类似明信片的某种东西），讨论了许多复杂的数学问题。其中一个问题是这样的：在一大群牛里，公牛和母牛各有四种颜色，每种颜色的公牛和母牛的数量满足一系列复杂的方程；解开这些方程，就能得出每种颜色的公牛和母牛的数量。满足这些条件的最小整数解需要用超过200000位的数字来表达。



1021

研究人员：

海什木

研究领域：

光学

结论：

光沿直线传播

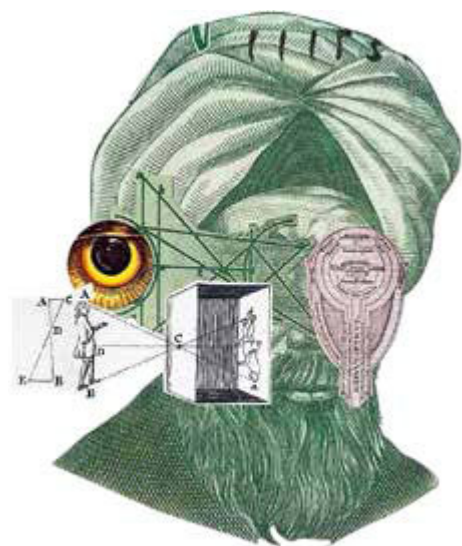
光是怎样传播的？

暗箱的诞生

阿拉伯学者穆哈默德·本·哈桑·本·海什木·巴士拉是最早进行系统性实验的科学家之一。

公元965年，海什木出生在伊拉克的巴士拉，后来他曾在巴格达求学。四十多岁的时候，海什木听说尼罗河每年都会泛滥，于是他冒冒失失地给埃及的哈里发写了一封信，毛遂自荐，试图解决这个问题。哈里发高兴地邀请他去开罗，并为他举行了盛大的欢迎仪式，希望他能解决这个痼疾。

海什木计划在如今的阿斯旺地区修筑一道水坝，这个主意听起来很有道理，但他没有想到建坝的工程居然如此浩大。海什木一路南行到了阿斯旺，他发现尼罗河宽达1英里（约1.6千米），虽然河水的干流分成了几个小的支流，但这样的规模依然超出了他的预想。以当时的技术，完全不可能修建这么长的堤坝，但海什木不敢坦承自己的失误，因为他知道，严酷残暴的哈里发一定会砍掉他的头。所以海什木决定装疯，“疯子海什木”被软禁了十年，直到1021年哈里发去世。



研究眼睛的工作机制

-

在这十年里，海什木潜心研究光学，为此他做了一系列相关实验。刚开始他研究的是眼睛的工作机制。欧几里得、托勒密和其他学者曾经提出，要看见某件物品——例如一棵树——我们的眼睛会向外射出一束光，照亮那棵树，然后树把光反射回眼睛里，形成图像。亚里士多德则认为，物体的影子会直接投射到我们的眼睛里。

海什木觉得这些说法都站不住脚。无论如何，光是外界客观存在的事物。白天的阳光会照亮万物，树木、房屋、人类，一切物体都会反射光线，照进我们的眼睛。正如海什木所说：“如果有一束光照亮了一件有颜色的物品，那么所有颜色和光一定都来自最初的光源。”我们只需要睁开眼睛，让光涌进来就可以了。为了弄清眼睛里面有什么，海什木曾经解剖过牛眼，他还画了精美的示意图来阐释人类眼睛的结构和工作机制。

海什木说，月亮靠近地平线的时候看起来更大，是因为地面上有树木和其他物品作为参照，月亮看起来很远，所以显得很大。而当明月孤零零地高悬在天空中的时候，它看起来更近，所以似乎就变小了。

暗箱

-

海什木猜测，光可能是沿直线传播的，因为物体在阳光下的投影边缘都相当清晰。为了证明这一点，他设计了暗箱，这个词的原意是“黑屋子”。暗箱实际上就是一间小黑屋，其中一侧的遮板上有个小孔，遮板对面是一堵白墙或者一块屏幕。埃及灿烂的阳光照亮了外面的世界，也透过小孔照进了小黑屋，将图像投射在对面的墙上。墙上的投影是左右上下颠倒的，但是毫无疑问，你的确可以通过投影看到外面的世界，图像是活动的，而且还有颜色。目睹这一切的人震惊不已，他们从没见过过这样的投影。

海什木解释说，要形成这样的图像，穿过小孔的光必然是沿直线传播的，否则你只会看到一大团各种颜色杂糅的模糊的影子。

他也在晚上做过暗箱实验，这时候外面一片漆黑，唯一的光来自三盏吊灯。而在暗箱里面，小孔对面的白墙上出现了三个光点，它们分别来自外面的三盏灯。吊灯、小孔和光斑之间形成了一条直线，只要用手挡在某盏灯与光斑之间的线上，墙上的光斑就会消失。这个实验有力地证明了光是沿直线传播的。



光学书

海什木还做过一些关于透镜、镜子、反射和折射的实验，他把自己的理论和实验归纳起来，撰写了一本《光学书》。这是世界上最早的实验科学著作，几个世纪后，列奥纳多·达·芬奇、伽利略、笛卡儿和艾萨克·牛顿都对它推崇不已。海什木一共写过两百多本书，但留存下来的只有大约五十本。

不过最重要的是，海什木堪称世界上最早的科学家。有人认为，海什木是科学方法的奠基人，他从不轻信其他作者的论述，而是通过系统地观察研究物理现象，然后根据现象归纳出理论：

“追求真理的人在阅读他人著作时应该把对方视为假想敌……然后从任何可能的角度攻击对方的论述。对于自己的观点，也同样不可掉以轻心，必须以最严格的方法进行检验，以免被偏见左右，或者一时心软。”

1307

研究人员：

弗莱贝格的狄奥多里克

研究领域：

光学

结论：

光会发生折射和反射

彩虹的颜色从哪儿来？

理解光的折射和反射

德国人狄奥多里克大约出生在1250年之前的某个时间，后来他成了一位道明会修士。从1293年到1296年，狄奥多里克在道明会逐渐升迁到了很高的职位。1304年，道明会在图卢兹举行了一次全体大会，总会长埃梅里克建议狄奥多里克从科学角度研究一下彩虹。

关于颜色的错误理论

-

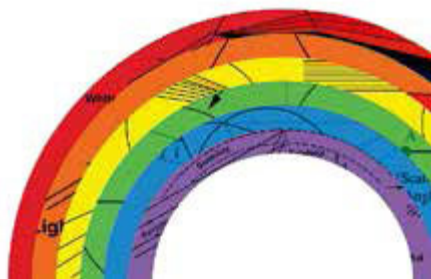
经过长期的思考，狄奥多里克提出了一套原创的颜色理论，并通过实验进行了验证，但实际上，他的想法错得离谱。现在我们知道，颜色表现为连续的光谱（红-橙-黄-绿-蓝-靛-紫），但狄奥多里克认为，红、黄、绿、蓝是四种“主色”，其中红色和黄色是“清晰的”，或者说半透明的；而蓝色和绿色是“模糊的”，或者说不透明的。

此外，他还相信，光传播到玻璃边缘或水面附近时，清晰的颜色表现为红色，但在玻璃或水体中央远离边界的地方，清晰色就会变成黄色。如果光在透明介质中传播，那么模糊色表现为绿色；如果介质不透明，模糊色就会转为蓝色。

光的折射和反射

-

为了验证自己的理论，狄奥多里克用玻璃棱镜做了一系列实验。他把棱镜放在阳光下，按照四主色理论，棱镜表面附近应该出现“清晰色”，而“模糊色”应该留在玻璃内部；清晰的红色应该出现在离镜面最近的地方，模糊的蓝色应该离镜面最远，因为棱镜深处的透明度最低。综上所述，透过棱镜观察到的色带应该按照红、黄、绿、蓝的顺序排列。



无论是在阳光下直接观察六角棱镜内部，还是让阳光穿过棱镜，在屏幕上投下色带，最终得到的结果都完全符合他的预想。根据狄奥多里克留下的示意图，我们可以推测他知道阳光在穿过棱镜的过程中发生了两次折射——进入和离开棱镜时各有一次——正是这两次折射让白光分成了颜色不同的条带。此外，从示意图中我们还可以发现，光在棱镜内部可能还会发生反射。



光的传播路径

-

然后，狄奥多里克将一个很大的圆玻璃烧瓶装满水来模仿雨滴，然后透过烧瓶观察太阳。抬头和低头的时候，他看见烧瓶内部出现了同样的色带，但是这一次，色带的顺序颠倒过来：最上面是红色，蓝色则跑到了最下面，和彩虹里的色带顺序一模一样。于是狄奥多里克意识到，之所以会出现这样的反转，是因为通过烧瓶的光不但发生了两次折射，还发生了反射。从他的示意图中，我们可以清晰地看到这一点。

通过这种方法，狄奥多里克证明了特定颜色的光线在经过烧瓶时会遵循特定的传播路径，所以我们才会看到颜色。颜色是客观存在的物理现象，而不是仅仅存在于观察者眼睛里的主观幻影。

于是狄奥多里克提出，光穿过雨滴的传播路径和他在烧瓶实验中演示的一模一样。由于雨滴数量多、速度快，所以虽然它们总在不停地运动，但实际效果却像是一道静止不动的雨帘。

不幸的是，在他绘制的示意图中，太阳和雨滴与观察者之间的距离几乎相等，这意味着穿过雨滴的光不是平行的。虽然这的确能够解释烧瓶折射后的色带为什么是环形的，但我们都知道，它不符合实际情况。

事实上，太阳离我们非常遥远。请想象一下，以太阳和你的头顶为两个定位点，绘制一条延伸至地面的直线——它与地面的交点就是你在阳光下的影子边缘。彩虹与这条直线的夹角永远是42度，因此，太阳在地平线上的时候，彩虹与地面之间的夹角达到最大值——42度。而且彩虹永远都是弧形的，只有在飞机上或山顶上观察时，你才有可能看见完整的圆形彩虹。

你永远无法到达彩虹尽头，因为它根本不是客观存在的物体，只是天空中的一种光学现象。如果你奔向彩虹，它也会不断移动。

反转

-

狄奥多里克把烧瓶调整到某个角度时，他观察到了第二道彩虹，而且这道彩虹的颜色顺序和前面那道恰好相反，它的顶端是蓝色的。这次狄奥多里克立即明白过来：光在烧瓶内发生了第二次反射。

虽然狄奥多里克提出的折射和颜色理论错得离谱，测出来的彩虹角度也不着边际，但他却为我们树立了一个科学研究的好榜样：提出

一套理论，然后通过实验去验证，这就是科学方法的基础。

2. 启蒙时代：1308—1760

漫长的黑暗年代里，似乎就连哲学家都开始屈从于宗教。如果有人问：“为什么会出现这种现象？”他很可能得到这样的回答：“因为这是上帝的意志。”接下来，终于有一些人开始追寻更符合逻辑的解释，并通过实验来验证自己的想法。17世纪20年代，英国哲学家弗朗西斯·培根撰写了一系列著作，鼓励人们善用自身经验，通过实验来研究科学。

在此之前，罗伯特·诺曼和伽利略已经举起了实验的大旗，不少人紧随其后。艾萨克·牛顿在发表第一篇科学论文时就已展现出惊人的才华。除了他以外，其他学者也开始研究光速、音速以及冰融化成水吸收的热量。不过，这个时期最伟大的成就还得数牛顿于1687年出版的著作——《自然哲学的数学原理》。

1581

研究人员：

罗伯特·诺曼

研究领域：

地球科学

实验结论：

自由漂浮的罗盘指针会深深扎进水里，指向极点

磁北极在哪里？

追逐罗盘指针

在海上漂泊了近二十年后，罗伯特·诺曼在英国伦敦附近定居下来，成了一名设备制造商。他的工作主要是制造罗盘，因为罗盘是水手最重要的导航设备。诺曼用铁来打造罗盘的指针，然后利用天然磁石（一种名叫“磁铁矿”的石头）对指针进行磁化。

诺曼相当了解磁偏角现象——罗盘的指针并不总是指向正北方——不过很快他又发现，除了水平偏角以外，罗盘指针还会往下沉，或者用他的话来说，“下倾”，于是诺曼决定深入探查其中的奥秘。



诺曼注意到，哪怕是质量最好的罗盘指针也无法保持平衡，哪怕支点的位置非常精确，指针的北端依然会微微下倾，因此他不得不在指针南端添加配重。有一天，诺曼制作了一套相当精密的指针和支点，结果却发现指针斜得厉害。为了减轻指针倾斜的程度，他决定把它截短一点。诺曼在笔记中写道：

“结果我把指针截得太短了，辛辛苦苦做好的东西立即变成了一堆废品，我感觉怒火中烧，于是我下定决心，非得弄明白这件事不可。”

诺曼决定制作一件工具——今天我们称之为“磁倾仪”——来探究这种现象，不过首先他想搞清楚指针北极下倾的原因：仅仅是出于磁场的影响，还是指针北端从磁石里吸收了什么“笨重的物质”？

第一个罗盘

-

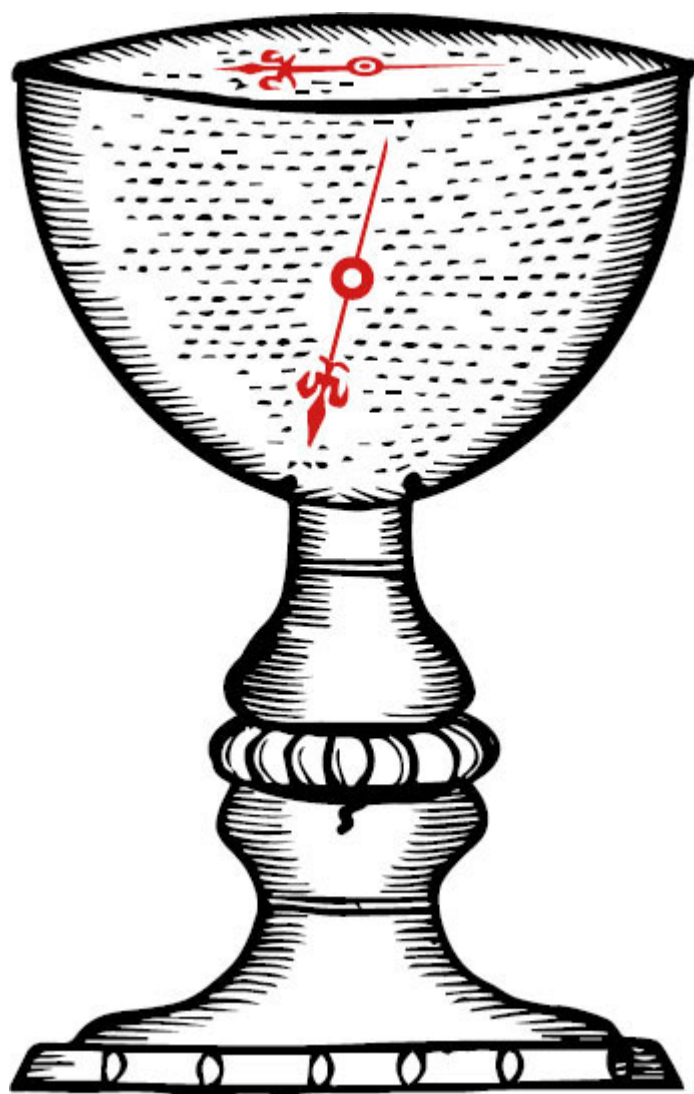
诺曼在天平的一端放了几块铁，然后在天平的另一端放了一些铅块，使天平保持平衡。接下来，他用磁石将铁磁化后重新放回盘子里，并记录了自己观察到的结果：

你会发现，铁在磁化前后的重量完全相同。此外，如果罗盘指针北端从磁石里吸收了什么物质，那么它的南端理应出现同样的变化，二者相抵消，指针北端不应该下倾才对。

酒杯实验

-

现在，你可以找一段大约2英寸（约5厘米）长的铁丝或钢丝，然后把一个软木塞穿在上面。木塞的大小足以带着铁丝漂浮在水面上。



接下来，你应该找个比较深的玻璃杯，如果没有，碗、水杯或者其他容器也行。在容器里装满清水，然后把它放到平稳无风的地方。完成这一步以后，请小心地切削穿在铁丝上的软木塞，让它刚好能够带着铁丝悬浮在水面下大约两三英寸的地方，既不下沉也不上浮，同时木塞两头露出的铁丝也在水面下保持平衡，就像一根完美支撑的杠杆。

换句话说，把软木塞穿在铁丝上以后，诺曼小心地切削木塞，让它正好能够带着铁丝漂浮在水面上。当然，他自己的笔记中写的是“悬浮在水面下方”，但这显然不可能做到，所以我们不妨认为，在他的实验中，水差不多刚好淹没了软木塞和铁丝。

接下来，诺曼取出水中的铁丝，用天然磁石将它磁化后再放回水里。“.....你会看见铁丝绕自己的中点旋转，与此同时，也出现了前面描述过的下倾.....”

水中的指针可以自由地在三个维度上运动，清晰地指出磁力最强的方向。水提供了理想的实验环境，机械装置不可能达到这样的效果，因为它们的摩擦力太大。

测量纬度

-

诺曼希望能够制造一种仪器，利用磁针倾斜的角度直接测量纬度。因为我们有充分的理由可以假设，离北极越近，磁针下沉的角度——或者说下倾的程度——就越大，二者之间很可能是稳定的线性关系。不幸的是，事情没有这么简单，不过诺曼的确造出了精密的磁倾仪。

接下来，诺曼开始思考天然磁石的磁场：“当然，我个人认为，如果这种特性（磁力）能够通过某种方式转化为人类肉眼可见的实体，那么它应该是球形的，围绕在磁石外面.....”

这个想法真的很棒，但诺曼最后还是和正确的结论失之交臂。直到几年以后，威廉·吉尔伯特才发现，地球本身就是一块巨型磁铁，它

形成了一个巨大的磁场——所以罗盘指针才会下倾。

1587

研究人员：

伽利略·伽利莱

研究领域：

引力

结论：

无论质量是大是小，所有物体都会以同样的速度坠落

大球和小球：谁坠落的速度更快？

引力和有关坠落的科学

作为实验科学早期阶段的一位重量级人物，伽利略思考世界的方式清晰明了，富有逻辑。他曾写道：“自然的规律.....可能并不复杂，基本的规律或许只有寥寥几条。”这听起来和奥卡姆剃刀原理异曲同工。

伽利略还曾写道：“自然哲学（例如科学）是用.....数学语言写成的，它的特性可以表达为三角形、圆形和其他几何图形。”

1581年的某一天，伽利略坐在比萨一座宏伟的大教堂里，无聊的他注意到头顶的黄铜大吊灯正在随着气流摇晃。教堂高耸的穹顶上垂着长长的链子，挂在链子上的吊灯缓慢地左右摇摆。伽利略利用自己的脉搏测量了吊灯摇摆的频率，然后他惊讶地发现，无论吊灯摇摆的幅度有多大，每次摇摆花费的时间都完全相同。



单摆实验

回家以后，伽利略将配重块系在绳子上，做了几个单摆来探究这一现象。他发现，单摆的重量和振幅都不会影响最终的结果，唯一与摇摆周期有关的值是绳子的长度。要想让单摆每次摇摆花费的时间增加到原来的两倍，那么绳子的长度需要变成原来的四倍。现在我们知道，单摆摇晃的周期公式可以表达为 $t=2\pi\sqrt{l/g}$ ，其中时间 t 以秒为单位， l 是摆绳的长度， g 是地球表面的重力加速度，即396.2英寸/平方秒（约10米/平方秒）。

伽利略意识到，根据这一特性，单摆非常适合用来校准机械钟，于是他亲自设计了一份图纸，不过直到1642年伽利略去世，他的设计依然停留在纸面上。直到15年后，荷兰博学家克里斯蒂安·惠更斯才制造出了世界上的第一座摆钟。

坠落的物体

-

1589年，伽利略开始思考亚里士多德的学说，尤其是关于物体坠落的论断。亚里士多德曾经说过，较大的物体坠落速度比小的物体更快，如果一块石头的重量是另一块石头的两倍，那么同时放手，较重的石头一定会先落地。

伽利略很想验证亚里士多德的理论，于是他设计了一个实验。传说他爬到了著名的比萨斜塔顶上，然后把两个重量不同的球同时扔了下去，观察二者坠落的速度。不过这个实验做起来有些困难，要做到同时放手就不太容易了，而且两个球坠落的速度太快，观察者可能根本看不清它们谁先落地，更别提准确测量落地的时间。

倾斜的平面

据我们所知，伽利略在一根木梁上挖了一道槽，然后打磨光滑，还在槽的内表面蒙了一层羊皮纸。然后，他支起木梁的一端，把光滑的铜球放进槽里，让它沿着梁向下滚动。利用这个倾斜的平面，伽利略实际上减缓了铜球坠落的速度，因此他可以方便地观察测量相关数值。

实验的难点依然是计时，刚开始伽利略靠自己的脉搏来计时，后来也用过水钟，最后他想到了利用声音来测速。他在沟槽旁边装了一排小铃铛，球滚过去的时候会碰到铃铛，发出清脆的声音。通过铃铛的声音，就可以比较准确地估算铜球的速度。

铃铛以相等的间距排列在沟槽旁边，随着铜球向下滚动，相邻的两个铃铛发声的间隔越来越短，换句话说，铜球在滚动的过程中，速度在不断地变快。伽利略不断更换铃铛的安装位置，最后发现，如果相邻的铃铛之间的间隔分别是1、3、5、7、9个单位，那么铃铛被碰响的时间就差不多是均匀的，也就是说，这些铃铛距离起点的距离分别是1、4、9、16和25个单位。通过这种方式，伽利略证明铜球在第1秒运动了1个单位，前两秒4个单位，3秒9个单位，4秒16个单位，5秒则是25个单位——换句话说，铜球运动的距离与时间的平方成正比。



均匀加速度

-

伽利略意识到，铜球的加速度是恒定的，或者用他自己的话来说：“从静止开始运动的物体在相等的时间段内获得的速度增量相同。”

伽利略的数学知识不足以让他推导出自由落体的运动公式，几十年后，牛顿将完成他未竟的工作。不过，这位意大利科学家的确证明了大球和小球沿着斜坡向下滚动的速度完全相同，亚里士多德的理论实际上是错的。

1648

研究人员：

布莱兹·帕斯卡

研究领域：

气象学

结论：

气压会随着海拔的升高而降低

山顶上的空气更稀薄吗？

大气压力

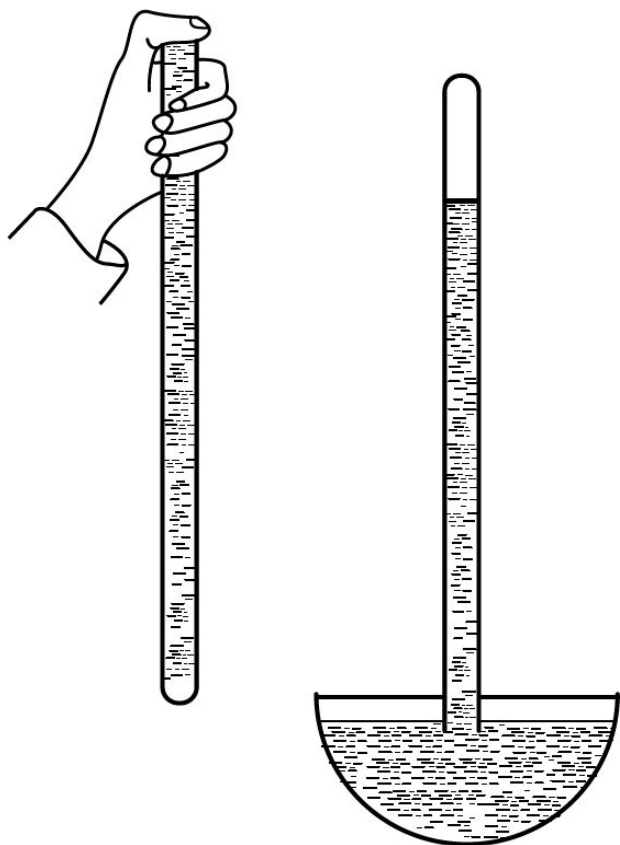
布莱兹·帕斯卡出生在法国克莱蒙费朗，小时候的帕斯卡就是赫赫有名的神童，长大以后，他成了一名数学家和物理学家。帕斯卡发明过一种计算器，与此同时，他也是纯数和数学概率领域的先驱。除此以外，帕斯卡对伽利略和托里拆利的工作很感兴趣，沿着前人开拓的道路，他最终发现了气压升降的奥秘。

伽利略和托里拆利

-

1642年，伽利略在去世前不久听到托斯卡纳大公手下的水泵制造商说起，他们的泵最多只能把水抽到大约30英尺（约9米）的高度。伽利略对这个问题颇有兴趣，去世之前，他还跟随侍在身边的学生埃万杰利斯塔·托里拆利谈起过这件事。

托里拆利决定利用水银来研究这个问题。因为水银的密度是水的14倍，所以要获得同样的效果，只需要一根不到3英尺（1米）高的水银柱。



托里拆利实验

托里拆利制造了一根长约3英尺（1米）的玻璃管，他封住管子的一头，在里面灌满水银。然后，他用手指堵住玻璃管的开口，将它倒放在一个装满水银的碗里。结果发现，玻璃管里的水银下降到了碗内液面上方大约29英寸（约74厘米）的位置。

玻璃管内水银液面上方的空间是什么？人们为此展开了激烈的争辩。托里拆利认为，那就是真空，但相信他的人寥寥无几，因为按照亚里士多德的说法，“自然界厌恶真空”，所以真空完全就不可能存在。

托里拆利也许还注意到，玻璃管内的水银液面会随着天气的变化上升或下降；沿着这条路走下去，接下来他就会发明气压计。遗憾的

是，1647年托里拆利就去世了，所以他没有机会继续探究这个问题。

帕斯卡的实验

-

布莱兹·帕斯卡对托里拆利的工作很感兴趣，他把水银换成其他各种液体做了一系列实验，最终都得到了相似的结果。帕斯卡很想知道，是什么力量让玻璃管内的液体始终维持在一定的高度，会是大气重量吗？如果真是这样，山顶上的大气压力应该比平地上小，因为那里的空气更加稀薄。于是帕斯卡大胆地推测，要是把同样的设备搬到山顶上，那么玻璃管内的液面应该会下降。



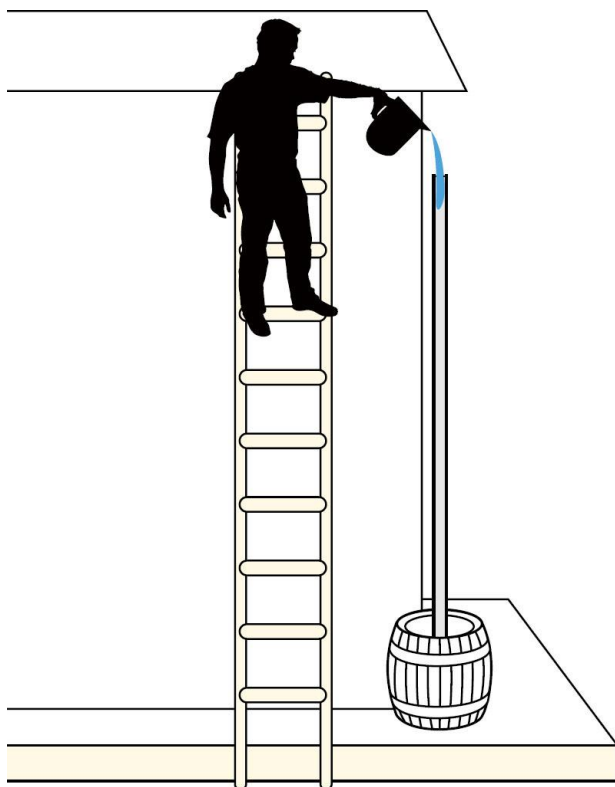
帕斯卡费了一番唇舌，终于说服了连襟弗罗林·佩里埃来帮他做这个实验。佩里埃住在法国中部的克莱蒙费朗，附近有一座3900英尺（约1189米）高的死火山——多姆山。1648年9月19日早上8点，佩里埃从山脚下的修道院出发前往山顶。动身之前，他测量了玻璃管里水银柱的高度：“我发现玻璃管内的水银柱比下方容器里的液面高26英寸3.5线（1英寸=12线≈2.5厘米）。”

在几位助手的帮助下，佩里埃带着4英尺（约1.2米）长的玻璃管和16磅（约7千克）水银爬上了山顶，在这里，他发现水银柱的高度下降到了23英寸2线，“我小心翼翼地重复读了五次数据……每次在山顶上选取的位置各不相同……但无论在哪里……水银柱的高度始终保持一致”。换句话说，山顶上的气压的确比山脚下更低。

帕斯卡原理

-

于是帕斯卡的理论得到了有力的验证，支撑玻璃管内水银柱或水柱的力量的确来自大气的重量。事实上，现在我们知道，海平面上的气压大约是15磅每平方英寸（psi），或者说100千帕（kPa）出头。1帕等于1牛顿每平方米。



帕斯卡的木桶实验

100千帕气压等于0.1牛顿压力每平方厘米（ N/cm^2 ）；这意味着你的每个脚指甲都承受着大约0.1牛顿的压力。幸运的是，指甲下面还有弹性十足的血肉，足以抵抗强大的气压。

帕斯卡还证明了液柱底部的压强与它的高度成正比。按照他的理论，在装满水的木桶上方垂直放置一根33英尺（约10米）长的细管，然后从细管顶部向管内注水，木桶很快就会被压裂。

帕斯卡指出，密闭容器内部各处的压强始终相等，今天我们称之为“帕斯卡原理”。注射器和液压系统都是根据帕斯卡原理发明出来的。

1660

研究人员：

罗伯特·波义耳

罗伯特·胡克

研究领域：

气体力学

结论：

一定质量的气体体积与它的压力成反比

轮胎为什么要充气？

气压和真空的力量

1627年1月25日，罗伯特·波义耳出生在爱尔兰南岸的利斯莫尔城堡里。少年波义耳曾跟随一位法国导师游历欧洲，回家以后，便决心要成为一名科学家。他加入了一个名叫“无形学院”的组织。该组织后来更名为“伦敦自然知识促进会”，然后逐渐变成了今天的皇家学会。

马德堡半球

-

马德堡市长奥托·冯·居里克在1654年制造了一个气泵，希望借此展示真空的力量，更确切地说，是气压的力量。1657年，居里克用气泵抽空了两个直径12英寸（约30厘米）的铜半球，于是气压让两个半球紧紧地合在了一起，就连两组马都无法将它们拉开；直到居里克将空气重新注入球内，两个半球立即毫不费力地分开了。



马德堡半球

与此同时，波义耳继承了爱尔兰的几片土地和一笔财富，移居到了牛津。他对托里拆利和帕斯卡的工作有所了解，听说了马德堡半球实验后，他雇用罗伯特·胡克制造了一个气泵，做了一系列实验。1660年，波义耳将自己的实验结果结集出版，这本书名叫《力学新实验：关于空气弹性及其效应的物理》。

气泵实验

-

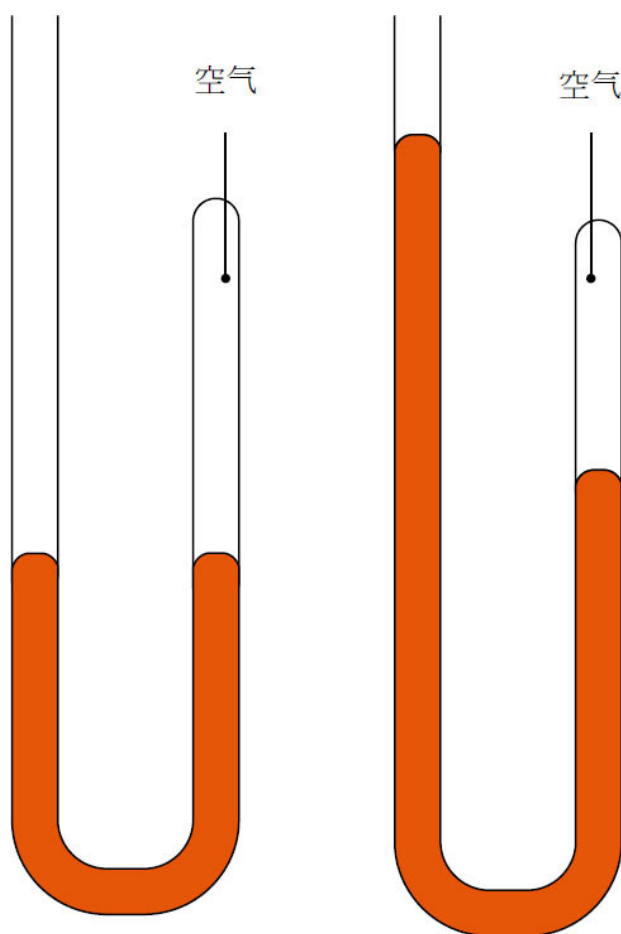
波义耳和胡克用气泵抽空了一个很大的钟形玻璃罐，容器内的气压可能还不到正常气压的十分之一，几乎可以视为真空。抽空玻璃罐之前，他们在里面放置了一些实验装置。这两位科学家的真空实验得出了下面的结果：

- 燃烧的蜡烛会熄灭，这说明火焰燃烧需要空气。
- 外部观察者无法听见真空罐里的铃铛发出的声音，所以声音需要空气才能传播。
- 烧红的铁在真空中会继续发光，所以光的传播不需要空气。
- 真空罐内的鸟和猫都死了，因此空气是生命的必需品。

J形管实验

-

在波义耳和胡克的实验中，如左图左侧所示，玻璃管内的水银将一小段空气封闭在管子末端。如果把管子放进钟形罐里，然后抽空罐子里的空气，玻璃管内的空气承受的压力就会减小；而若是继续往管子里注入水银，封闭空气承受的压力就会增大，如左图右侧所示。



J形管

波义耳和胡克发现，如果压力减小，玻璃管内的空气体积就会变大；若是压力变大，空气体积则会缩小，但波义耳在书中并未深入探讨这一现象。

与此同时，在英国的兰开夏，汤利庄园的理查德·汤利与物理学家亨利·鲍尔也用J形管做了一系列实验。1661年4月27日，这对搭档在潘

多山海拔约1000英尺（约300米）的山腰上用J形管采集了一份“山谷空气”样品。到达山顶以后，由于这里的气压较低，他们发现管子里的空气体积变大了。于是两位科学家又采集了一份“山顶空气”。回到山脚下以后，他们发现，空气体积缩小了。

那一年冬天，汤利和波义耳讨论了自己的实验，他提出，空气的体积和压力之间可能存在反比关系。于是波义耳做了几个定量实验，然后一丝不苟地记录下了自己的观察结果，最后他得出结论，一定质量的气体体积与它的压强成反比，这就是现在我们所知的“波义耳定律”。

空气的弹性

-

波义耳认为，空气由无数极小的羊毛圈似的微粒组成，这些粒子在受力时会像弹簧一样压缩，不过一旦压力消失，它们立刻就会反弹回来。他专门写了一本书来阐述空气的弹性。正是出于这个原因，我们的汽车和自行车都采用了充气的轮胎，因为空气的弹力有助于减轻路面的颠簸。

气压计

-

有传言称，托里拆利并未发现静置的玻璃管里水银柱的高度会出现细微的变化，但波义耳和胡克的确注意到了这个现象，他们推测，这可能和潮汐的变化有关。不过经过反复观察，两位科学家发现，水银柱的高度和潮涨潮落毫无关系，实际上，水银柱在天气晴朗时会升

高，阴云密布时则会降低，尤其是在暴风雨来临的时候，水银柱会出现明显的下降。所以，气压计的发明者应该是波义耳和胡克，而不是托里拆利——虽然他的确为两位后来者指明了方向。

1672

研究人员：

艾萨克·牛顿

研究领域：

光学

结论：

白色是彩虹的所有颜色混合形成的

“白色”是一种颜色吗？

探究白光的特性

艾萨克·牛顿自幼体弱多病。他出生于1642年的平安夜，刚出生的牛顿看起来又瘦又小，大家都觉得他根本熬不到白天。牛顿三岁时，他的父亲去世了，随后他的母亲改嫁给了一位有钱的牧师，可怜的小男孩被托付给了粗枝大叶的外祖父母。孤独的童年赋予了牛顿内省的性格，他喜欢专注地思考各种各样的问题，从彩虹的颜色到月亮和行星的运行轨道。这让他成了历史上最伟大的科学家。

17世纪60年代末，牛顿设计制造了一台反射望远镜——这是世界上最早的反射式望远镜。后来他又造出了第二台。当时牛顿在剑桥大学担任卢卡斯数学教授，他在课堂上提到了自己的发明。皇家学会的管理者看到望远镜后立即授予了牛顿院士资格，并询问他还做了哪些研究。1672年2月6日，牛顿给皇家学会写了一封回信，详细阐述了自己的棱镜实验。

光谱

-

“我制造了一间暗室，然后在窗户的遮光板上凿了一个小洞，让一束阳光透过小洞照进暗室。接下来，我把棱镜放在光束中，将阳光折射到对面的墙壁上。”

透过棱镜的阳光形成了五彩斑斓的光谱，色带的长度是宽度的五倍，牛顿大吃一惊。他试着调整各个实验条件：将棱镜放到遮光板外面，让光束照射棱镜更厚的部分，把遮光板上的洞开得更大，但结果还是和原来一样。于是牛顿得出结论，自己观察到的现象一定来自光的折射。



牛顿仔细测量了房间的长度，由此计算出光的折射角度，最后发现，蓝光的折射角大于红光。牛顿宣布，他在光谱中观察到了七种颜色：红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫。大部分人觉得蓝色就是光谱的尽头，但下方的色带的确还有细微的差异。或许牛顿的眼睛特别敏感，或许他早就认定了颜色应该有七种，因为“七”在他心目中拥有神秘的重要地位。

“然后我开始猜测，也许光.....不是沿直线传播的，也许不同颜色的光各自按照一定曲率的弧线传播，所以才会墙上投下斑

斓的色带。当我想到被球拍击飞的网球沿弧线飞行，我就更加怀疑这一点了。”

旋转的网球一侧受到的空气阻力比另一侧更大，所以牛顿猜测光粒子也会产生相似的效果——他相信光由粒子（或者说“球状体”）组成。可是他的实验表明，光的确是沿直线传播的。

接下来，牛顿做了一个所谓的“判决性实验”。他在一块板子上戳了个洞，然后把它放在墙和棱镜之间，每次只允许一种颜色的光透过小洞。挡板后有另一块棱镜，某种颜色（比如说绿色）的光透过小洞穿过第二块棱镜，再次发生折射，在墙上投下一片绿色的光影。牛顿发现，光第二次折射的角度和第一次完全相同，而且颜色不会发生任何变化，也不会进一步分化成其他颜色。

白光是什么？

-

牛顿总结道，阳光“由不同折射角度的光线组成，根据折射角的不同，这些光线在墙上投影形成色带”。换句话说，白色的阳光是所有颜色的光混合组成的，棱镜可以把白光分解成色带，因为每种颜色的光折射角度各不相同。“基于同样的原理，我们可以解释坠落的雨滴里为什么会出现彩虹。”

最后，牛顿用一组透镜（或者另一个棱镜）将所有颜色的光重新组合形成白光。在附言的四个段落中，他描述了自己如何意识到反射式望远镜可以消除普通透镜式望远镜难以摆脱的色像差，于是他亲自造了一台新式望远镜，用它来观察木星的卫星和新月相位的金星。



然后牛顿继续写道：“所有自然物体的颜色都来源于此，我们之所以会看到物体的颜色，是因为它反射了更多这种颜色的光。”在暗室

里，牛顿把各种物体放在光谱中观察，结果发现，任何物体都可以随心所欲地改变颜色，但是“如果物体在阳光下呈现某种颜色，那么只有在这种颜色的光带中，它看起来才最为鲜艳生动”。

1676

研究人员：

奥勒·罗默

研究领域：

光学

结论：

罗默测量得出，光的传播速度约为133000英里/秒（约214000千米/秒）

光速是有限的吗？

探寻光的速度

1672年，丹麦科学家奥勒·罗默应邀离开哥本哈根前往巴黎，成了法国的皇家数学家，他还有一个任务是教导路易十四的儿子。罗默在皇家天文台完成了大量观测。当时这里的台长是意大利天文学家乔凡尼·多美尼科·卡西尼，卡西尼发现了土星环上的缺口，直到今天，这道缝隙仍被称作“卡西尼缝”。

木星的卫星

-

当时卡西尼一直试图解决在海上测量经度的问题。1610年，伽利略发现了木星最大的四颗卫星（它们被统称为“伽利略卫星”），于是他提出，可以利用这几颗星星来测量经度。这些卫星绕着木星沿固定的轨道运行，其中木卫一的轨道离木星最近，它的大小和月球差不多，公转周期还不到两天。

只有在这些卫星运行到木星正面时，地球上的观察者才能看见它们，然后卫星逐渐消失在那颗巨大行星的阴影中，直到下一次重新出现在阳光下。如果水手能够测量木卫一的运行周期，再与事先制好的表格比对，就能算出自己所在的经度，因为在地球上不同地点观测到的木卫一离开木星阴影的时间会有细微的差别。

但这种方法有几个问题。第一，要等待木卫一出现，你需要持续观察很长一段时间，这不是一件容易的事情，而若是空中有云遮挡，你可能根本看不见那颗卫星。另外，定点观察在陆地上很容易做到——只要有望远镜就行——但海上的船时时刻刻都在运动，几乎不可能长时间固定在某个位置。所以，利用木卫一来计算经度实际上根本不可行。

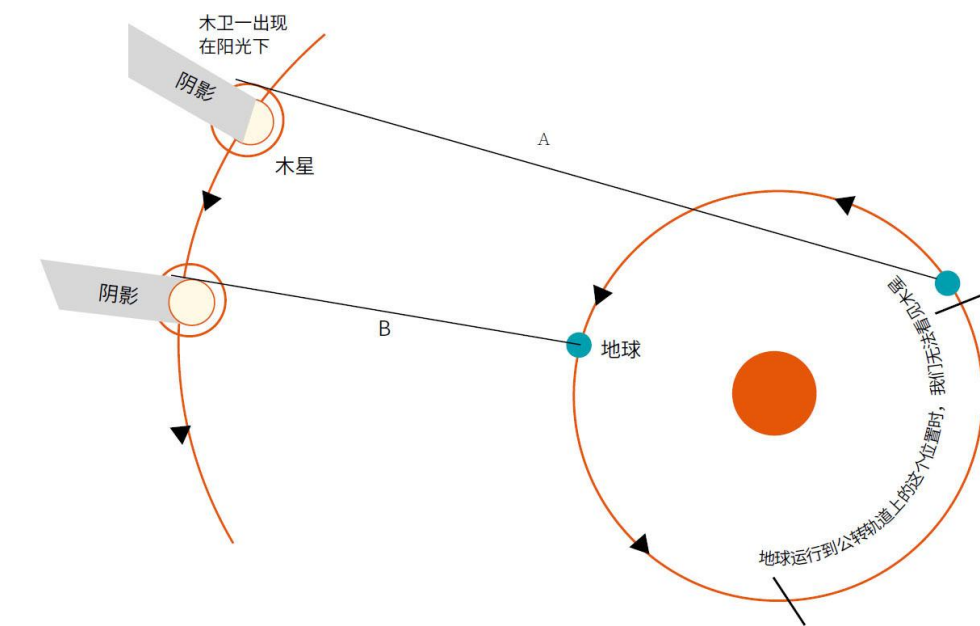
尽管如此，巴黎皇家天文台的天文学家还是搜集了木卫一大量的运行数据，卡西尼也曾制作表格，预测什么时候能在地球上的各个地点观察到它。

发现异常

-

罗默意识到，这些数据里隐藏着一些秘密。卡西尼的表格不太可靠，有时候需要修正，但更严重的问题是，按照表格中的数据，地球与木星的相对位置会出现有规律的异常变化。

每年中有几个月的时间，地球上的人们根本看不到木星，因为它运行到了太阳背面，或者离太阳的位置太近，完全被恒星的光芒掩盖，所以无法观察。不过，当木星重新出现在我们的视野中时，它与地球的距离相当遥远（见下方示意图中的距离A）。接下来，地球在轨道上继续运行，我们与木星间的距离逐步缩小，直至抵达最近点（见下页示意图中的距离B），然后两颗行星间的距离才会再次拉开。



利用天体计算经度

天文学家惊讶地发现，地球与木星之间的距离最近时，我们看到木卫一的时间比木星刚刚出现在视野中的时候早了11分钟；换句话说，木星分别位于近地点和远地点时，木卫一离开木星阴影的时间有11分钟的误差。唯一可能的解释是，光需要11分钟的时间才能跑过这段距离，即A与B之间的差值。

罗默并不知道地球与太阳之间的准确距离，不过根据当时最准确的估测值，他算出了光在这11分钟内的传播速度至少应该是133000英里/秒（214000千米/秒）。这个值比我们今天公认的光速（186000英里/秒或299792458米/秒）慢了大约25%，不过这毕竟是人类第一次测量光速，考虑到测量的难度，这个值已经算是非常接近。

巧妙的预测

1676年9月，罗默预测称，9月9日本卫一出现的时间会比表格里的理论值晚10分钟。结果他说的完全正确。

尽管如此，卡西尼仍拒绝接受罗默的假设和推理，而罗默也从未正式发表过自己的研究成果。不过，去英国访问的时候，罗默得到了牛顿和爱德蒙·哈雷的赞同和支持。后来罗默回到哥本哈根，成了丹麦的皇家天文学家，并出任了皇家天文台台长。

1687

研究人员：

艾萨克·牛顿

研究领域：

力学

结论：

在没有外力作用的情况下，物体将保持静止或匀速直线运动

“苹果砸头”的故事是真的吗？

牛顿运动定律

1665年，剑桥大学因瘟疫而暂时关闭，艾萨克·牛顿回到了家乡。这段时间里，这位孤独的思考者做出了一生中最重要的科学发现。

传说牛顿住的房子前面有一棵很老的苹果树——他看到苹果从树上落下——于是他想到，一定有什么力量把苹果从树上拽了下来，所以可以推测，地面会产生向下的拉力，其作用范围至少能延伸到苹果树顶。那么，这种拉力的效果能延伸到月亮上吗？如果能，它就将影响月球的运行轨道。这会是真的吗？

根据传说，牛顿一把拽过母亲的地契，直接在背面开始演算。他意识到，物体所在的位置越高，它受到的引力就越小，于是牛顿猜测，物体与地心距离的平方和引力成反比。他认为自己的计算结果“看起来很接近事实”。牛顿还进一步推测，其他绕轨运动的天体之间也存在同样的引力，所以他称之为“万有引力”。

不过在接下来的十多年里，牛顿并未对外公开自己的发现。直到某一天，三位朋友——爱德蒙·哈雷、罗伯特·胡克和克里斯多佛·雷恩——像往常一样在咖啡馆里聊天，谈到彗星的运行轨迹时，他们展开了争执。胡克觉得自己能算出彗星绕太阳运行的轨道，结果却失败了。

访问剑桥

-

哈雷是牛顿为数不多的朋友之一。1684年，哈雷前往剑桥拜访牛顿时谈到了彗星轨道的问题，如果天体之间的引力与距离的平方成反比，那么彗星运行的轨迹会是什么样的？牛顿立即回答，应该是一条椭圆形轨道。这个答案之所以会脱口而出，是因为他早就算过——不过接下来他马上发现，原始的演算草稿居然找不到了。于是他答应重新算一遍，再把结果寄给哈雷。

同年11月，牛顿完成了这篇论文——《论天体的轨道运动》，他在文中解释了引力与距离平方成反比的理论。1687年，牛顿不朽的巨著《自然哲学的数学原理》出版发行，人们通常简称为《原理》。

这部艰深的著作作用拉丁文写成，书中不光介绍了平方反比公式和万有引力，还提出了我们今天熟知的牛顿三大运动定律，由此奠定了经典力学的根基。

苹果的故事

-

威廉·斯蒂克利是一位古文物研究者——他醉心历史，热爱考古，为巨石阵的研究做出了巨大的贡献。除此以外，斯蒂克利还是牛顿的好朋友，他为这位伟大的科学家撰写了第一本传记。在这本书里，斯蒂克利生动而骄傲地记录了发生在1726年4月15日的一场对话：



“我前去拜访艾萨克·牛顿爵士……并和他一起待了一整天。那天的天气很好，晚饭后我们来到花园里，坐在苹果树下喝茶。牛顿告诉我，他之所以会想到引力的概念，最初的灵感来自树上掉落的苹果。苹果为什么总会垂直掉到地上，而不是向上飞、向左向右运动，或者沿斜线落地呢？”

斯蒂克利继续写道，这些问题“在他的脑海里盘旋”，“于是他反复思考，最终发现了万有引力和引力的作用机制；接下来，他开始运用

这些规律来解释天体的运动和物质的聚合，由此发现了宇宙哲学的真正法则”。

1727年，牛顿的助手约翰·康杜特在他撰写的牛顿传记中同样提到了这件事：“1666年，牛顿再次离开剑桥，回到林肯郡的母亲家里。有一天，他满怀心事地在花园里散步，看到苹果后突然想到，引力不仅仅作用于地面上的这一点空间，它的延伸范围比我们通常以为的要远得多。”

所以，牛顿至少给两个人讲过苹果的故事，不过这时候距离事件发生已经有60年了，也许这个故事只是他随便编的。

他为什么要编造这个故事？

-

根据牛顿留下的信件我们可以推测，在1682年之前，他一直认为行星绕太阳运行的轨迹是一个巨大的旋涡，就像从排水孔流出去的水一样。这套理论最早是笛卡儿提出的。不过到了1682年，哈雷彗星的出现推翻了笛卡儿的假设，因为它运行的方向与其他行星完全相反。

1674年，胡克就曾提出引力的概念，也几乎完成了相关的数学计算。牛顿绝不肯承认胡克能在任何事情上胜过他，也许正是出于这个原因，他才编造了发生在多年前的苹果的故事，来证明自己在1666年就想到了引力的概念，比胡克早得多。

1760

研究人员：

约瑟夫·布莱克

研究领域：

热力学

结论：

冰变成水，水变成蒸汽都需要吸收热量

冰是.....热的？

通电流体的性质

苏格兰裔的约瑟夫·布莱克出生于法国南部，因为他的父亲是一位葡萄酒商，所以他们家在波尔多拥有一幢洋房，还在附近买了一座带农舍的葡萄园。

对布莱克来说，去寒冷的贝尔法斯特求学应该是一段颇为痛苦的经历，后来他又去了格拉斯哥大学进修科学和医学。18世纪50年代初，仍在攻读博士学位的布莱克首次分离出了纯净的气体，他得到的是二氧化碳，当时的人们称之为“凝固的空气”。

融化的雪

-

1755年和1756年的冬天格外寒冷。1757年，布莱克成为格拉斯哥大学的教授以后，他开始对冰雪的融化产生了兴趣。他曾在课堂上讲道：



“如果我们深入思考冰雪融化的现象……尽管最开始冰雪的温度很低，但很快它们就会被加热到熔点，于是冰雪的表面开始融化成水。如果……冰融化成水只需要吸收一点点额外的热量，那么无论冰块의体积有多大，它都应该会很快融化……要是事实果真如此……春天的洪水应该来得比现在凶猛得多。”

事实上，冰雪融化可能需要花费几周甚至几个月时间，于是布莱克推测，这个过程或许并不容易。但这是为什么呢？

他观察到，“就算没有温度计，我们也可以轻松地察觉到，较热物体的热量总会向周围较冷的地方扩散，直至温度分布均匀……热量达到某种平衡的状态”。

利用温度计，布莱克做了个实验。他把1磅（约0.45千克）热水和1磅冷水混在一起，最后得到的2磅水温度正好处于两者之间。

然后，布莱克又设计了另一个实验。他在两个一模一样的烧瓶里装满水，然后将烧瓶A冷却到接近冰点，即32°F（0°C），烧瓶B则刚好冷却到冰点以下，里面的水自然就结冰了。接下来，他把两个烧瓶并排悬挂在安静的房间里，等待瓶内物质在室温下自然升温。烧瓶A

里的水半小时后就达到了室温，但烧瓶B里的水达到同样的温度却花了超过十个小时。显然，冰变成水需要吸收大量的热，直到冰完全融化以后，它的温度才会开始上升。



潜热

-

布莱克认为，能够用手触摸——也能用温度计测量——的热叫“显热”，而冰融化所需的额外热量则是“潜热”，意思是“隐藏的热”。

为了验证这个理论，他又取了两个烧瓶，在烧瓶C中装满水，烧瓶D则装入水和酒精的混合溶液。布莱克在两个烧瓶里各放了一支温度计，然后在一个寒冷的晚上把它们放到了室外。两个烧瓶内的液体温度最终都下降到了32°F。

不过，烧瓶C里的温度计下降到32°F以后就再也不动了，温度计周围的水开始结冰；而烧瓶D里的温度还在继续下降，因为酒精溶液的凝固点比水更低。

沸腾的水

-

然后，布莱克以同样的方式研究了沸腾的水——如果手边有合适的温度计，你也可以自己试试。这个实验需要的量程大约是 $65\sim 220^{\circ}\text{F}$ （约 $18\sim 104^{\circ}\text{C}$ ）。

将温度计放在装水的锅里，然后把锅放到炉子上加热。水的温度会逐渐上升到 212°F （ 100°C ），然后开始沸腾；在水沸腾的过程中，它的温度不会继续上升。换个火力更大的炉子，水会沸腾得更快，但温度还是保持不变。

让水沸腾需要外界的热量，热会赋予每个水分子足够的能量，让它摆脱液态的束缚，蒸发成气态。这部分热依然是潜热——蒸发所需的潜热。

詹姆斯·瓦特和他的分离式冷凝器

-

几乎可以肯定，布莱克发现的潜热启发了他的朋友詹姆斯·瓦特。1765年，瓦特发明了分离式冷凝器，由此大幅提高了蒸汽机的效率。

1766年，布莱克来到爱丁堡大学，这里的很多学生是当地酿酒商的儿子。好奇的学生纷纷询问布莱克，为什么蒸馏工艺需要消耗那么多燃料，导致威士忌的价格居高不下？布莱克的回答非常简单：因为潜热。将液体蒸发为气体需要消耗大量能量，蒸汽冷凝后才能分馏出威士忌。

3. 更广阔的领域：1761—1850

18世纪的科学面临着来自各个领域的挑战。牛顿时代的人们一定会觉得测量地球重量完全是个不可能的任务，但是到了18世纪，这个问题竟有了两种可能的解答。最终，一位不太情愿的天文学家和一位孤僻的天才分别测出了地球的重量。

电池的发明改变了科学和世界的面貌，几门新的学科就此萌芽，我们今天使用的各种电子设备也离不开电池。耐心的酿酒师詹姆斯·焦耳苦心钻研多年，终于找到了热与力之间的关系，但其他科学家却对此心存怀疑。

除此以外，人们仍为光的特性和行为争执不休。电磁现象被发现以后，迈克尔·法拉第和其他科学家进行了深入的研究，在前人的基础之上，他们造出了电动机、变压器、电磁铁和发电机。

1774

研究人员：

内维尔·马斯基林

研究领域：

引力

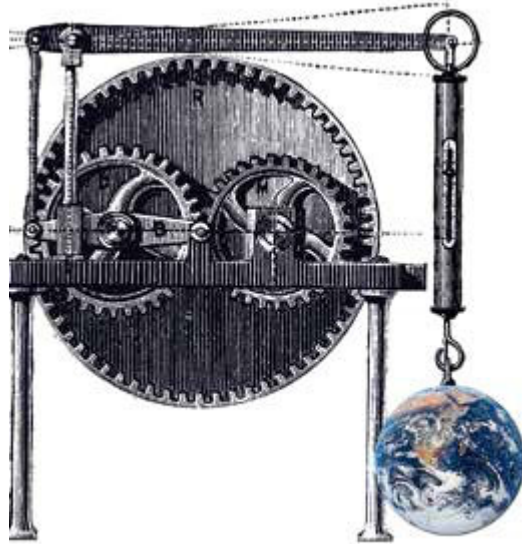
结论：

地球内部不是空的，而是有一个金属质地的核

你能称出这个世界的质量吗？

利用山峰完成测量的壮举

牛顿在1687年出版的巨著《原理》中曾经提到，单摆（系在绳子上的配重块）总会垂直指向地心，不过要是附近有山，那么山峰质量产生的引力会让单摆产生微微的倾斜。牛顿认为“山的引力”确实存在，但实际上，它的效果非常微弱，完全无法测量。



测量山的引力

-

八年后，皇家天文学家内维尔·马斯基林意识到，如果能够测量山的引力效应，那么或许可以利用这种方法算出地球的质量。在山峰附近悬挂一个单摆，测出单摆倾斜的角度，再估算一下山峰的质量，就能算出地球的质量。这个数值非常重要，因为知道了地球的质量，就

能进一步推算出月球、太阳和其他行星的质量。1772年，马斯基林向皇家学会提交了建议，皇家学会批准了他的提案，并派遣测量师查尔斯·曼森骑马周游苏格兰，寻找合适的山峰。经过一个漫长的夏天，曼森终于回到伦敦，他找到的最佳山峰是珀斯以北45英里（约72千米）处的榭赫伦山。



谁来做实验？

-

曼森拒绝承担实地实验的任务，马斯基林也表示自己很忙，而且不管怎么说，他还有个皇家天文学家的头衔——这意味着要他去做这个实验，首先必须得到国王的批准。不幸的是，国王非常支持这件事，所以他欣然批准了皇家学会的申请。马斯基林不情不愿地离开了格林尼治那间舒适的宿舍，乘船前往北方的珀斯。到达港口后，他骑上驮马，直奔高地。

山中岁月

-

榭赫伦山长而狭窄，大致呈东西走向，山顶海拔3543英尺（约1080米）。马斯基林在南麓的半山腰里扎下营来，他有一间茅舍、一顶帐篷、一座精确的摆钟，还有从皇家学会借来的长达10英尺（约3

米)的望远镜。马斯基林计划借助头顶的星星找到自己的准确位置，然后通过单摆来确定“垂线”。不幸的是，山里的雨雾缭绕了足足两个月，他完全无法进行任何观测，然后又过了一个月，他才终于算出了自己的确切方位。

然后，马斯基林设法绕到榭赫伦山的北麓——这花费了他整整一周时间——再次进行位置测量。与此同时，另一组测量师带着简陋的帐篷、铁链(用来测量长度)、气压计(测量高度)、经纬仪(测量角度)和其他设备绕着山峰转了一整圈。他们记录了不同地点的数千个角度和高度，并利用这些数据算出了马斯基林两个营地之间的距离。

矛盾的数据

-

利用单摆和头顶的星星，马斯基林算出了两个营地的确切位置和二者之间的距离。他算出的数字和测量师得出的结果之间有1430英尺(约436米)的误差，因为山峰本身有引力，所以单摆的垂线并不是完全垂直的。

两个数据之间的误差比他预计的要小，这意味着地球的平均密度远大于榭赫伦山。以前曾有人提出，地球是个空心的球体，就像网球一样；现在这套理论不攻自破。马斯基林表示，恰恰相反，地球一定拥有一个金属质地的地核。

接下来，马斯基林只需要测出山峰的质量，就能算出地球的质量。他可以大致估计山峰的密度——单位体积的质量，但要得出最后的结果，他还得测量山峰的体积。

计算体积

-

为了完成这个任务，马斯基林请求一位数学家朋友提供帮助。查尔斯·赫顿意识到，他可以利用测量师记录的高度数据来计算山峰的三维立体形状。赫顿在一份报告中提到，他用铅笔把所有高度相等的点连了起来，于是山峰的形状立即跃然纸上。换句话说，他发明了等高线。

知道了山峰的体积，马斯基林和赫顿成功地算出了榭赫伦山的质量，并由此推算出，地球的质量大约是 5×10^{21} 吨。17世纪牛顿曾经估计过，地球的质量是 6×10^{21} 吨，最后我们发现，居然是牛顿的数值更接近真相。

无论如何，马斯基林的壮举是人类测量地球质量的第一次尝试。

1798

研究人员：

亨利·卡文迪许

研究领域：

地球科学

结论：

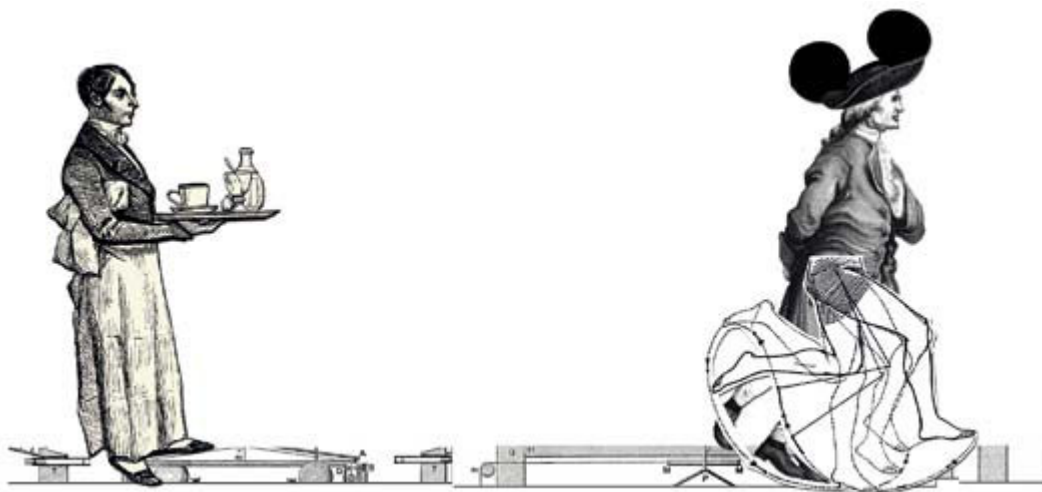
地球的质量是 6×10^{21} 吨

你能（不借助山峰）称出这个世界的质量吗？

另一种测量地球质量的方法

约翰·米切尔原本是剑桥大学的地质学教授，负责讲授算术、几何、神学、哲学、希伯来语和希腊语，不过37岁的时候，他离开剑桥前往约克郡的桑希尔，成了圣米迦勒与诸天使教堂的院长。米切尔可能是想为自己的科研工作争取更多的时间和金钱，所以才接下了这份报酬颇为优厚的工作。1784年，他在一封写给皇家学会的信里首次提出了黑洞的设想。他还设计制造了一台测量地球质量的设备，但从未真正亲自动手测过。1793年，米切尔去世了。在此之前，他把这台设备留给了他的朋友亨利·卡文迪许。

亨利·卡文迪许的性格颇为怪异，如果他生在今天，我们或许会说他有点自闭。卡文迪许的祖父和外祖父都是公爵，家资颇丰，他甚至在英国伦敦克拉珀姆公地的家里建造了自己的实验室。据说卡文迪许是有史以来最富裕的学者，当然，他或许也是富人中最有学问的那一个。



沉默的天才

-

卡文迪许总是穿着一件皱巴巴的紫色外套，戴着黑色的三角帽。他特别害羞，不愿意跟人打交道。每次不得不开口说话的时候，他的语气总是有些迟疑，音调也高得吓人，所以他很少说话。一位同行曾经评价说，卡文迪许一辈子说的话可能比特拉普会的修士还少，众所周知，这个教派以沉默寡言闻名。参加皇家学会会议的时候，他也总是一言不发。

1766年，卡文迪许成功分离了氢气——这是人类有史以来得到的第二种纯净气体——他发现这种气体轻而易燃，与空气混合后会发生爆炸。氢气爆炸的唯一产物是水，卡文迪许由此推断，水的化学式应该是 H_2O 。他把这个结果告诉了詹姆斯·瓦特。1783年，瓦特发表了这项成果。

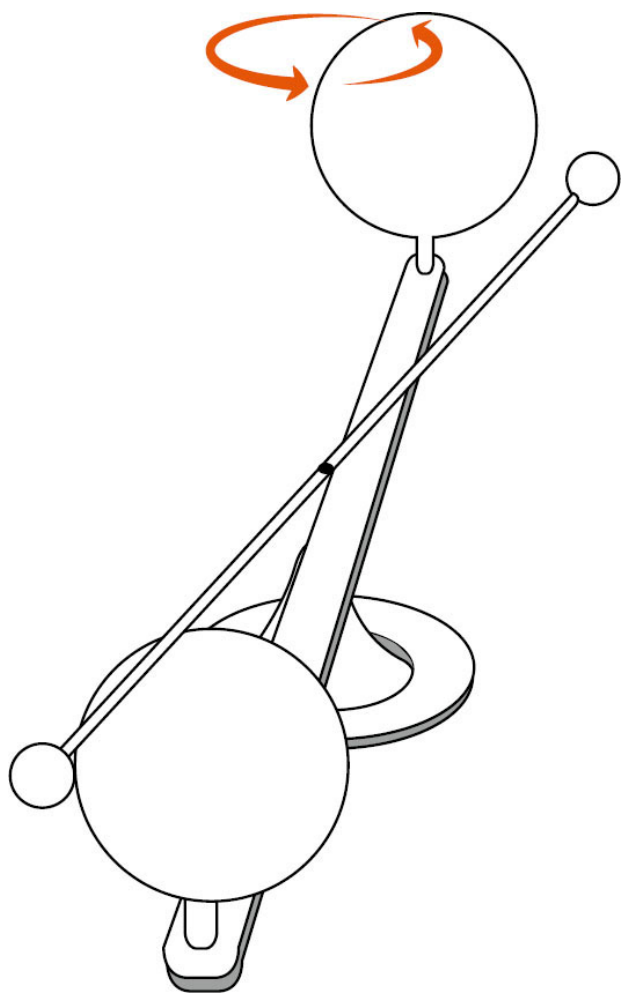
称量世界

-

卡文迪许装好了米切尔的设备，准备测量地球的质量，验证20年前马斯基林测得的结果。实际上，卡文迪许的实验比马斯基林的更加简单精确，他用铅球取代了山作为引力的来源。

卡文迪许用一根很长的细绳将6英尺（约1.8米）长的木杆水平悬挂起来，木杆两头各有一个直径5厘米、重1.61磅（约0.73千克）的铅球。每个铅球的逆时针方向（见下页图）9英寸（约23厘米）处又各放置了一个直径12英寸（约30厘米）、重350磅（约159千克）的大铅球。

大球对小球的引力会让小球发生偏转，于是木杆也会随之旋转；当细绳产生的扭力正好等于小球受到的引力时，木杆将保持平衡。卡文迪许知道小球的重量——也就是地球对小球的引力。如果能够测量大球对小球的引力，那么就能算出地球的质量与大球质量的比值。



卡文迪许实验

灵敏的设备

-

整套设备需要静置几个小时才能稳定下来，这个实验非常精密，气温的细微变化和微弱的气流都可能影响结果。所以卡文迪许把实验设备安装在专门的房间里，通过外部的控制设施进行调整，然后利用望远镜透过窗户观察结果。

小球稳定下来以后，卡文迪许记录下它们的位置，然后将大球移动到小球的另一侧，于是小球开始朝反方向旋转。小球再次稳定下来

以后，卡文迪许发现，它们只移动了0.16英寸（约4.1毫米）。测量结果非常精确，足以让卡文迪许算出大球的引力。

实际上，大球的引力很小——大约只有15毫微克，相当于一小粒沙子的质量——但这已经够了。卡文迪许细心地排除了任何可能的误差，由此算出地球的平均密度大约是水的5.4倍，他得到的地球质量和我们今天公认的结果（ 5.97×10^{24} 千克）非常接近。

现在，物理系的学生经常会做这个实验，虽然最初的想法和设备都来自约翰·米切尔，但人们仍将它命名为“卡文迪许实验”，因为是他首次实施了这个实验。

1799

研究人员：

亚历山德罗·伏特

研究领域：

电学

结论：

由此诞生了几个新的科学分支

电池是如何发明的？

制造第一个电池

古人对静电并不陌生——实际上，“电子”这个词在希腊语中的意思是“琥珀”，因为古希腊人知道，用布摩擦琥珀就能产生静电。

本杰明·富兰克林将风筝送入雷雨云，由此证明了闪电也是电的一种形式，不过直到现在，人类还是没有成功驯服闪电。要想研究“电流”的性质，科学家必须设法制造出持续的小剂量电流。

动物电

-

1780年，意大利科学家路易吉·伽伐尼在博洛尼亚大学完成了第一步，他提出，动物是由电驱动的。伽伐尼无意中发现，解剖台上的青蛙腿抽搐了一下，当时附近正好有一台静电发电机。伽伐尼打算把青蛙挂在铜钩上晾干，结果铜钩正好碰到了一块铁，两种金属接触的瞬间，青蛙腿再次抽搐起来。于是伽伐尼大胆猜测，青蛙的身体会产生电，虽然它很久以前就已经死了。时任帕维亚大学自然哲学（物理）教授的亚历山德罗·伏特对抽搐的青蛙腿很感兴趣，但他并不相信动物会产生电流。伏特认为，电实际上是两种金属接触产生的。从1793年到1794年，伏特发表了几篇论文来阐述自己的想法，并开始进行下一步的研究。



不同的金属

-

伏特将一片锌和一片银（例如硬币）放在一起，然后用舌头轻轻舔了舔。与两种金属接触的瞬间，他感觉舌尖微微有些刺痛。为了获得更强的效果，伏特想出了个聪明的主意：他制造了许多个这样的“金属三明治”，然后把它们叠到了一起。

不过，锌—银—锌—银的组合无法达到理想的效果，因为每组金属产生的电很快就会被下一组反向叠放的金属抵消，所以伏特需要用能够导电的非金属介质把这些金属片两两隔开，换句话说，他需要的是某种非金属导体。伏特选择了泡过盐水的纸板。所以，“三明治”的结构变成了锌—银—纸板—锌—银—纸板—锌，如此排列下去。他称之为“伏特堆”，又叫“电池”。

伏特制造的原始电池相当粗糙，它产生的电压或许只有几伏，不过足以让他感受到电击的力量。伏特用导线把电池两头连接起来的时候，导线的接头也冒出了火花。

1799年，伏特就捣鼓出了电池的雏形，后来他曾为拿破仑做过演示，法国皇帝深受震撼。不过更重要的是，1800年3月20日，伏特写了一封长信给英国皇家学会的会长约瑟夫·班克斯爵士，详细介绍了自己的实验。6月26日，班克斯在皇家学会大声朗读了这封法语信的英文译本：

“我把几十个小圆片叠了起来.....银片的直径大约是1英寸（约2.54厘米）锌片的大小和它差不多，数量也完全相同。我还准备了一些.....圆形的纸板.....它们可以吸收并储存大量.....盐水。”

电击之痛

-

伏特在信中写道，可以用一根粗导线将电池组与一碗水连起来。“现在，如果把一只手浸到碗里，再用金属片轻轻触碰金属堆的另一头，浸在水里的那只手就会感觉到明显的电击和刺痛，直达手腕，有时候刺痛甚至会传播到手肘的高度.....”

他还说：“如果在这套装置的两头分别接上一根探针，然后把两根探针放进耳朵里，那么你的听力就会大受影响。”

现在回头去看，伏打所做的不过是电了自己几下，制造了一点点火花，似乎完全不足为奇。但好戏这才刚刚开始。班克斯读过这封信以后，其他科学家立即开始动手制造电池，他们制造的电池产生了持续的电流，这是破天荒第一次。

有了这样的电池，科学家就能深入研究各种材料的性质，寻找导体和绝缘体。除此以外，他们还能探查电流本身的性质，研究电势（它的单位是“伏”，也就是“伏特”的简称）、电流（安培）、电阻（欧姆）和其他相关知识。

化学里的电

-

汉弗里·戴维在伦敦的皇家研究所制作了一个巨大的电池，并用它做了一些令人叹为观止的化学实验。戴维推测，不同的金属接触后一定会发生某种化学反应，因此产生了电流。所以他觉得可以用电流来诱发化学反应，根据这个思路，戴维首次分离出了金属钠和钾。

今天我们使用的大部分物品似乎都离不开电。伏特的实验或许是科学史上最为重大的发现。

1803

研究人员：

托马斯·杨

研究领域：

光学

结论：

光以波的形式传播——果真如此吗？

光会互相干涉吗？

杨氏双缝实验

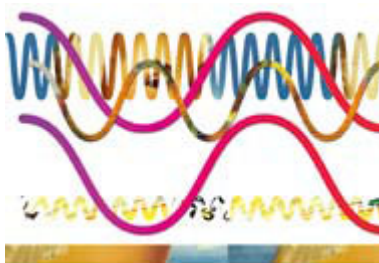
艾萨克·牛顿在1672年那篇著名的论文和1704年的著作《光学》中都曾提到过光“线”，不过总体而言，他认为光是由粒子组成的。但荷兰博学家克里斯蒂安·惠更斯不同意牛顿的观点，他认为光是由波组成的。一百多年来，两人的争议一直没能得出一个确定的结果。

粒子还是波？

-

另一位博学家托马斯·杨在许多领域做出了杰出的贡献，19世纪初，他发表了一系列论文，阐述了光的折射。杨认为光以波的形式传播，他的实验结果验证了这一理论。杨知道，两个有细微差别的音节同时奏响，你就能听见明显的节拍，因为声波会产生干涉。于是他推测，如果光真的是一种波，那么两道光波也应该会互相干涉。

和牛顿一样，杨也在窗户的遮光板上戳了个小洞，然后用一片黑纸把它盖了起来，又用针在黑纸上扎了一个孔。接下来他利用一面镜子，把透过小孔的阳光反射到对面的墙壁上：



“我用一片宽约1/13英寸（约2毫米）的纸板挡住了那束光，观察它在墙上和离墙距离不等的其他纸板上投下的影子。影子两侧边缘都有彩色的光晕，除此以外，影子中央也出现了平行的色带。”

类似的实验有很多，其中最著名的是“双缝实验”：光透过纸板上的两条狭缝投射到屏幕上，会产生明暗相间的图样。它更广为人知的名字是“杨氏实验”，虽然没有任何证据表明杨曾经做过这个实验。

干涉图样

-

如果光真的是由粒子组成，那么透过两条狭缝的光束只会在屏幕上投下两条明亮的线，但实际上，它却形成了明暗相间的图样。

每道狭缝相当于一个独立的光源，它们各自发射出一道光波。来自狭缝A的波峰与来自狭缝B的波峰重叠时，屏幕上就出现了明亮的条纹；而两道光波的波峰和波谷互相抵消，就会形成暗淡的条纹。

我们实际观察到的结果是，屏幕上出现了明暗相间的条纹，它唯一可能的来源是光的折射和干涉，所以光必然是以波的形式传播的。虽然杨的实验十分缜密，推理过程也相当严谨，但仍有很多科学家拒绝接受他的说法，因为伟大的艾萨克·牛顿怎么可能犯错呢？直到50年后，人们发现光在水中的传播速度比在空气中慢得多，杨的理论才终于得到了认可。

屏幕上两道相邻明亮条纹之间的距离是光波长的函数，也就是说，不同颜色的光会产生宽度不等的条纹。



粒子图样



波图样

现在物理学家普遍认为，光以“波包”的形式传播，也就是光子。杨并不知道，真正令人震惊的是极低照度的光表现出的某种特性：如果光源每次释放的光子只有一个，那么它可以同时穿过两道狭缝。

要是单个光子只能穿过一道狭缝，那么它应该直接投射到屏幕上的某个点，不会产生任何干涉。那么我们把屏幕换成光敏摄像机，然后让单个光子逐一通过狭缝，胶片上最终应该出现离散的光子组成的点状图样。



但事实并非如此。我们发现，胶片上留下的仍是明暗相间的条纹。于是我们就这样跨入了量子力学的诡异领域。根据量子力学，单个光子不一定只能出现在一个地方。比如说，它有30%的概率穿过狭

缝A，70%的概率穿过狭缝B，那么量子力学会告诉你，它可能同时穿过两道狭缝，与自己发生干涉。

既是波又是粒子

-

换句话说，光子同时表现出了粒子和波的特性，我们称之为光的波粒二相性。归根结底，那些相信粒子说的人也不算大错特错。

1961年，科学家发现电子也有同样的特性。电子肯定是某种粒子，因为它拥有质量，但与此同时，电子也表现出了波的一些性质。1974年，研究者通过实验证明，单个电子也会形成干涉图样。

理查德·费曼评论说：

“经典物理.....完全无法解释这种现象，它属于量子力学的领域。”

1820

研究人员：

汉斯·克里斯蒂安·奥斯特

迈克尔·法拉第

研究领域：

电磁学

结论：

电和磁可以相互作用

磁能产生电吗？

发现电磁现象

电池已经诞生了20年，很多科学家用它来做实验，但谁也没有系统地研究过电流和磁场之间的关系。

1820年4月21日，哥本哈根大学的物理教授汉斯·克里斯蒂安·奥斯特正在准备给学生上课，合上电池开关接通电流的时候，他发现桌上的罗盘指针轻轻动了一下。然后奥斯特断开电流，罗盘指针又动了一下。

这个发现并非完全出于偶然，因为当时他正在研究电和磁之间的关系。经过仔细探查，奥斯特发现，导线中的电流会在周围产生一圈磁场，就像套在手臂外面的袖子一样。三个月后，他把自己的成果发表在了了一本私下流传的小册子上。

巴黎

-

法国科学院的弗朗索瓦·阿拉戈和安德烈·玛丽·安培听说了奥斯特的的工作，于是他们立即行动起来。安培发现，如果两条平行导线中的电流朝相同的方向流动，那么这两条导线会互相排斥；而若是电流方向相反，它们就会互相吸引。他建立了一套数学理论来解释这个现象，根据安培定律，这两条导线之间的力与电流强度成正比。

伦敦

-

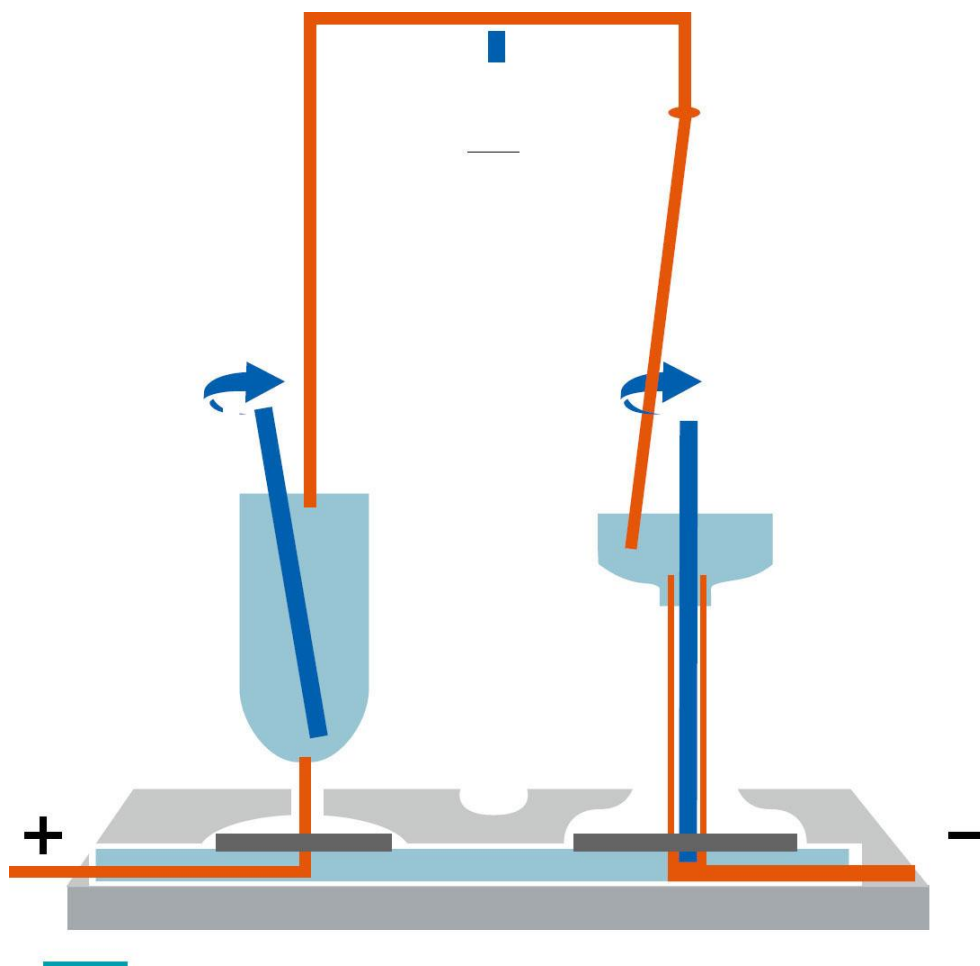
奥斯特的发现也传到了伦敦的皇家研究所，汉弗里·戴维和威廉·海德·沃勒斯顿试图利用这一原理制造电动机，但没有成功。当时戴维的助手是迈克尔·法拉第。听到戴维和沃勒斯顿讨论电动机的事情以后，法拉第也开始思考电和磁之间的关系。

1821年9月初，法拉第做了一系列实验，研究通电导线附近的罗盘指针受到的引力和斥力。根据自己的观察结果，他画了一些示意图。在最后一张示意图中，他画了一根导线绕着罗盘指针——或者说磁铁——旋转。根据这幅图，法拉第制造了一个玩具电动机。

第一台电动机

-

最早的电动机结构相当简单。它的主体是两个盛放水银的玻璃杯，左侧的杯子上方悬挂着一根固定的铜棒，铜棒末端刚好浸入液面以下，玻璃杯底还放着一根磁棒，它可以绕铜棒旋转；右侧杯子里的导线可以活动，磁棒则固定在玻璃杯里的水银中间。通电以后，电流产生的磁场与磁棒的磁场方向相反，于是左侧杯子里的磁棒会围绕铜棒旋转，而右边杯子里的导线则围绕磁棒旋转。



简单的电动机

电动机的成功让法拉第兴奋不已，这是他的第一个重大发现。激动之下，他没有知会戴维和沃勒斯顿，直接就把这个结果发表出去。沃勒斯顿大发雷霆，他指责法拉第剽窃了自己的创意，双方因此陷入了旷日持久的争执。

1829年，戴维去世以后，法拉第终于可以自由地继续研究电和磁了，很快他就发现了另一件事情，这或许也是他一生中最重要的发现：磁铁可以诱使线圈产生电流，这就是电磁感应现象。法拉第把两组独立的线圈绕在同一个铁环上，给其中一个线圈通电的时候，另一个线圈中也会产生瞬时的感应电流。法拉第还发现，磁铁穿过线圈时

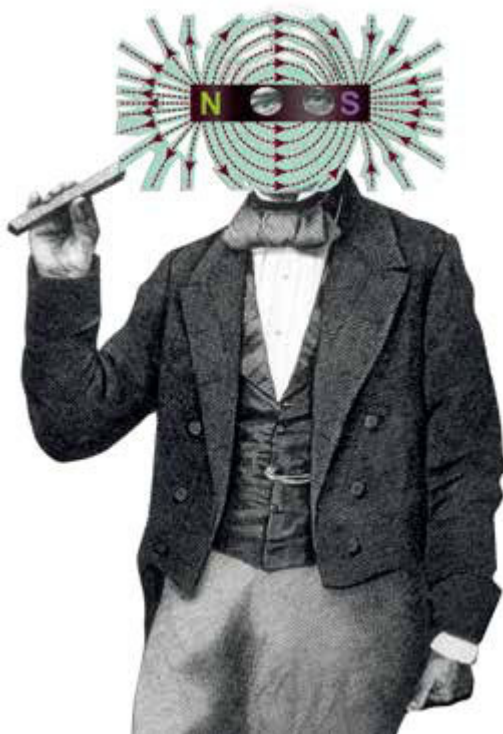
会产生电流，线圈在静止的磁铁旁移动也同样能产生电流。这些实验表明，磁场的变化会产生电流，换句话说，机械能可以转化为电能。法拉第的发现最终让我们造出了变压器和发电机。

场线

-

法拉第几乎没有上过学，也没有接受过任何数学训练，但是，他用场线描绘了电磁场的形状。法拉第把一张纸放在磁铁的两极上方，然后在纸上撒了一些铁屑，在磁场的吸引下，铁屑形成了一道道规律的弧线，这就是磁场在空间中的形状。

1845年，法拉第通过实验证明，强磁场能够扭转偏振光的传播平面，后来他还发现了抗磁性现象，即某些物质会对磁场产生微弱的斥力。



1842

研究人员：

克里斯蒂安·安德烈亚斯·多普勒

研究领域：

声学

结论：

声波可以压缩或拉伸，具体取决于观测者与声源之间的相对运动

声音能拉伸吗？

运动如何改变声调

1842年，38岁的多普勒发表了他一生中最重要的论文——《论天体中双星和其他一些星体的彩色光》。这篇论文的原稿是用德语写的。在这篇论文中，多普勒提出，光以波的形式传播，光的颜色取决于波的频率。

他还表示，如果光源和观察者发生了相对运动，那么波的频率也会随之变化。多普勒举例说，如果一艘船在波涛汹涌的水面上行驶，那么它顺风航行的速度肯定远远大于逆风航行的速度。在这种情况下，船的运动速度会影响它遇到波浪的频率，航行的速度越快，单位时间内遇到的波浪就越多。于是多普勒总结说，声波和光波也会出现类似的现象。

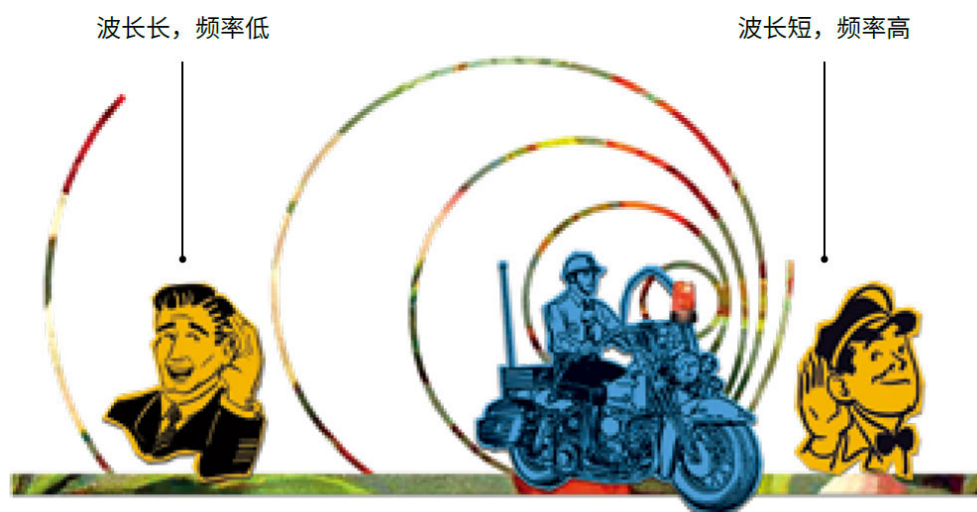
多普勒效应

-

如果一台应急车辆——救护车、警车或者消防车——正朝你开过来，你会听见它的警笛声变得越来越响，不过请注意听警笛的音高，或者说声调。当它向你靠近的时候，警笛的声调会变得越来越亢，而当它从你身边经过以后，声调又会逐渐降低，最后消失不见。

之所以会出现这样的现象，是因为应急车向你飞驰而来的时候，声波遭到了压缩。警笛发出的每个相邻波峰之间的距离都会压缩一点

点，所以波峰之间的距离比车辆静止时更短。波峰全都挤到了一块儿，声音就会变得尖厉而高亢。而当车辆远离你的时候，每个相邻波峰之间的距离都会拉伸一点，于是声波被拉长了，频率自然也就随之降低。



声源移动产生的多普勒效应

以此类推，鸭子和天鹅在水面上游过时，其前方的涟漪会挤到一起，而身后的则会散开。

双星

-

在1842年的那篇论文中，多普勒提出，恒星发出的自然光是白色或暗黄色的。但是，如果某颗恒星正在向我们靠近，那么它发出的光会比正常情况下更加偏蓝；而若是某颗星星正在远离我们，那么它的光看起来就会偏红。

两颗距离很近的恒星会组成双星系统，而且双星通常会以很快的速度围绕对方旋转。天鹅座 β 就是一个著名的双星系统，其中较大的那

颗恒星偏红，较小的恒星呈现出明显的蓝色。多普勒推测，较大的恒星正在靠近我们，而较小的恒星正在远离我们。

他总结说，如果两颗恒星的亮度相仿，那么它们的颜色也会互补，但如果二者亮度差别较大，那么明亮的那颗星星质量更大，所以另一颗星星会围绕它旋转。在天鹅座 β 的双星系统中，较大的恒星只是微微有些偏红，但另一颗却非常蓝，这说明做旋转运动的主要是蓝色的那颗星星，红星几乎保持静止。

多普勒还举了周期性变星的例子。这种星星大部分时间根本观察不到，但它们会突然出现在天空中，看起来是红色的。多普勒说，变星大部分时间释放的是看不见的红外线——所以我们观察不到它们——但实际上，这些星星都是双星系统，它们绕着看不见的伙伴旋转。运行到轨道上的某个位置时，它们的速度变得很快，导致释放的射线向光谱的红色端移动，于是我们就看见了红色的星星。

今天，天文学家利用多普勒效应来测量恒星与星系相对于地球的运动速率。正在靠近我们的星星看起来更蓝，这就是所谓的“蓝移”，而远离我们的星星则会出现红移。1929年，爱德文·哈勃利用多普勒效应——星系的红移——证明了宇宙在不断地膨胀。

1848年，希波莱特·斐索发现，多普勒效应同样适用于电磁波，所以在法国，人们有时候也会把这种效应称为“多普勒-斐索效应”。

多普勒效应的实际应用

警察利用雷达测速仪来监测驾驶员是否超速。测速仪发出的雷达波会被车辆反弹回来，根据发射波与回波之间的频率差，测速仪——也就是监测者——可以算出车辆的行驶速度。

医生也会用类似的设备检测血流，比如说，利用超声波检查颈部动脉。只要把设备以特定的角度放在病人的脖子上，仪器就能测出动脉内部的血液流动的速度。

我们还可以利用激光多普勒测振仪来测量振动。用激光照射待测物体的表面，通过反射回来的光线，仪器就能测出振动的各种参数。

1843

研究人员：

詹姆斯·普雷斯科特·焦耳

研究领域：

热力学

结论：

水需要很多能量才能产生一点点热量

让水变热需要多少能量？

热的特性

早在1798年，好奇的美国间谍伦福德伯爵就曾探索过热的本质。伦福德在巴伐利亚做了一个实验，他用一个特别钝的钻头给炮筒钻孔，结果产生了大量的热。伦福德表示，这些热完全是由摩擦产生的，它一定与铁粒子的某种运动有关。

不幸的是，当时的主流观点认为热是一种流体：如果你把热的物体和冷的物体放在一起，那么一部分“热流”会渗进冷的物体里，让它变得暖和起来。法国科学家拉瓦锡将这种流体命名为“热质”，他还表示，热质既不能被创造，也不能被销毁。

蒸汽还是电？

-

詹姆斯·普雷斯科特·焦耳出生于英格兰北部的索尔福德，他的父亲是一位酿酒师。焦耳继承了父亲的事业，不过他对电很感兴趣，所以他经常在家里做各种各样的电学实验。焦耳想弄清楚新出现的电动机能否取代酿酒厂里的蒸汽机，1841年，他发现“载流导体产生的热与电流强度的平方和导体电阻的乘积成正比”，或者简单地表达为“热量与（电流）²×电阻成正比”。这就是著名的焦耳定律。

焦耳研究了蒸汽机，然后他计算得出，当时最好的康沃尔蒸汽机对外输出的能量还不到它产生的热量的十分之一，也就是说，“这种蒸

汽机的效率低于10%——简直还不如马”，焦耳总结道。

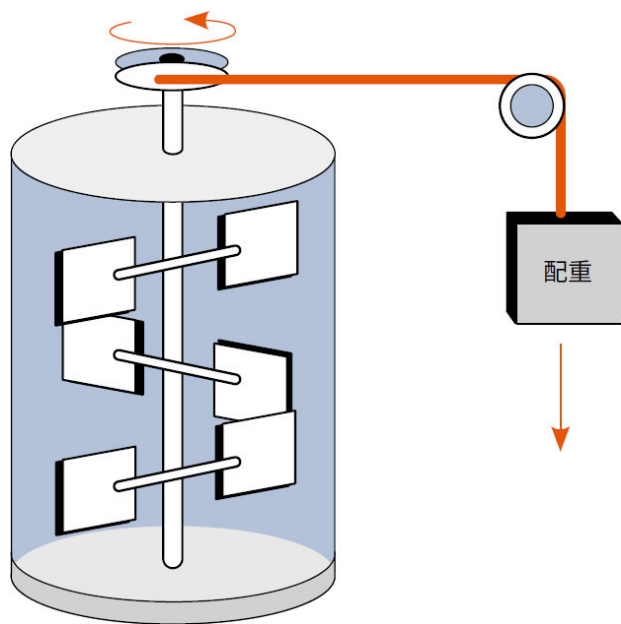
焦耳还发现，在一些电学实验中，电路的某些部位会发热。根据热质理论，这些热一定来自电路的其他部位，因为热质不会凭空产生或消失——可是仔细检查了所有设备以后，焦耳发现，电路里并没有哪个地方变冷了，这些热只能来自电流本身。

此外，如果你紧紧地握住一根绳子，然后快速地把它抽出来，你的掌心一定会火辣辣地发烫。手掌与绳子之间没有任何流体——它们只是发生了相对运动。焦耳决定深入探索各种形式的运动到底能产生多少热量。

桨轮

-

焦耳在水罐里装了一套桨轮，然后在桨轮的轴上绕了几圈绳子，利用外部的配重块拉动绳子，带动桨轮旋转。他知道配重块下降时做了多少功，然后又测量了罐子里的水每分钟的温度变化。水的升温速度很慢，所以焦耳不得不反复测量，才能得到有用的数据。



焦耳的桨轮实验

在一次实验中，他设计的配重块行程长达11米。焦耳反复把它拉起来又放下去，重复了整整144次——但罐子里的水温只升高了区区几度。

焦耳尝试过用电来加热水，他还曾迫使水穿过狭窄的管道，测试它的温度是否会因此而升高。有传说称，焦耳在法国南部度蜜月时也总是想着做实验，他甚至试图测试萨朗什瀑布顶部和底部的温差。不幸的是，瀑布对水温的影响微乎其微，就连尼亚加拉瀑布顶部和底部的温差也只有大约1/5摄氏度。

焦耳总共尝试过用五种方式来加热水，最终他得出结论：平均而言，要让0.25磅（约0.11千克）的水升温1华氏度（0.56摄氏度），你需要让800磅（约363千克）的配重块下降1英尺（约30厘米）。

冷遇与否认

1843年，焦耳在英国科学促进会的一次会议上宣布了自己的结论，但迎接他的却是岩石般的沉默。焦耳的理论颇具争议性，没有哪家主流期刊愿意发表他的研究成果。

迈克尔·法拉第对焦耳的理论倒是有些兴趣，他“深受震撼”，不过依然将信将疑。威廉·汤姆森（即后来的开尔文男爵）也心存怀疑，不过后来焦耳在度蜜月时又和他见了一面，从那以后，汤姆森开始逐渐接受焦耳的理论。从1852年到1856年，两人频繁通信，后来，他们共同发现了焦耳-汤姆森效应：气体在压力作用下通过阀门后温度会下降。今天所有的冰箱、空调和热泵都是利用这一原理制造出来的。



焦耳的理论逐渐得到了广泛的认可，国际能量单位“焦耳”就来自他的名字。现在我们知道，4.2焦耳的机械功等于1卡路里热量。

有趣的是，焦耳还曾说过：“物质中蕴含的能量来自上帝的恩赐，所以人类当然无法创造或毁灭它。”换句话说，出于某些很不科学的原因，詹姆斯·普雷斯科特·焦耳首次提出了能量守恒的概念。

1850

研究人员：

阿曼德·希波莱特·路易斯·斐索

让·伯纳德·莱昂·傅科

研究领域：

光学

结论：

光的确是以波的形式传播的

光在水里会变快吗？

反射与折射

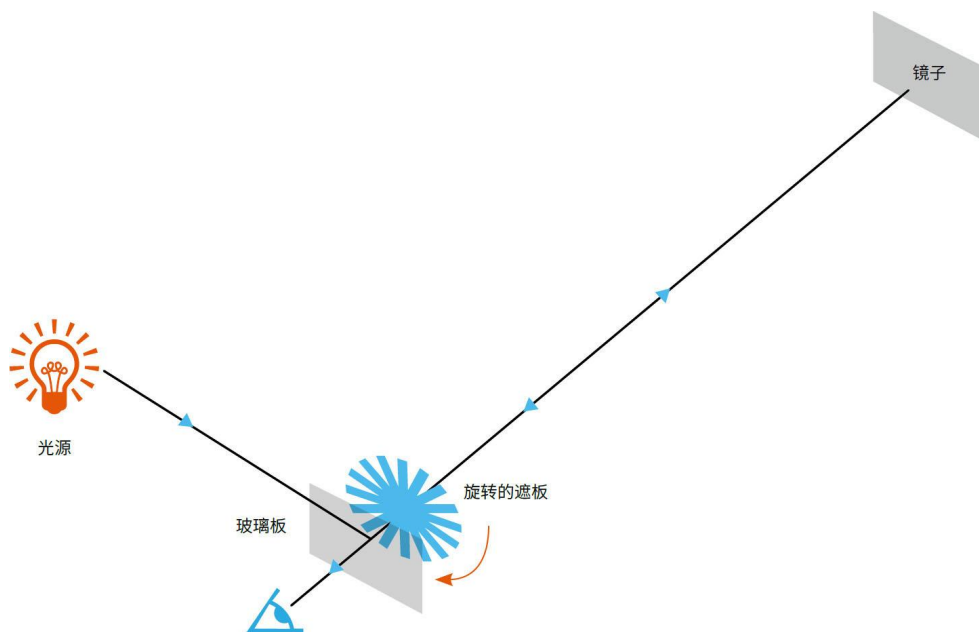
1676年，奥勒·罗默就曾测量过光速；1729年，詹姆斯·布拉德雷又利用“光行差”的天文学方法重新测量了光速。

1819年9月，希波莱特·斐索和他的朋友莱昂·傅科先后在法国巴黎出生，他们的生日相隔只有五天。少年时他们俩都是医学生，后来又一起参加了摄影术先驱路易·雅克·达盖尔开设的摄影课程。斐索和傅科共同改进了摄影的流程，不过后来又有其他实验者发明了更好的方法。

测量地球上的光速

-

斐索在医学院里得了偏头痛，所以他转而改学了物理。1849年7月，斐索在巴黎的父母家里设计了一个巧妙的实验来直接测量光速。他制作了一个带有100个齿的圆形遮板，用一束光透过轮齿之间的空缺照射5英里（约8千米）外的一面镜子，光会被镜子反射回来，往返路程长达10英里。然后斐索转动齿轮遮板，当它的转速达到一定值的时候，反射回来的光会直接投射到遮板后面。这意味着入射光和反射光分别穿过了遮板上两道相邻的空缺。

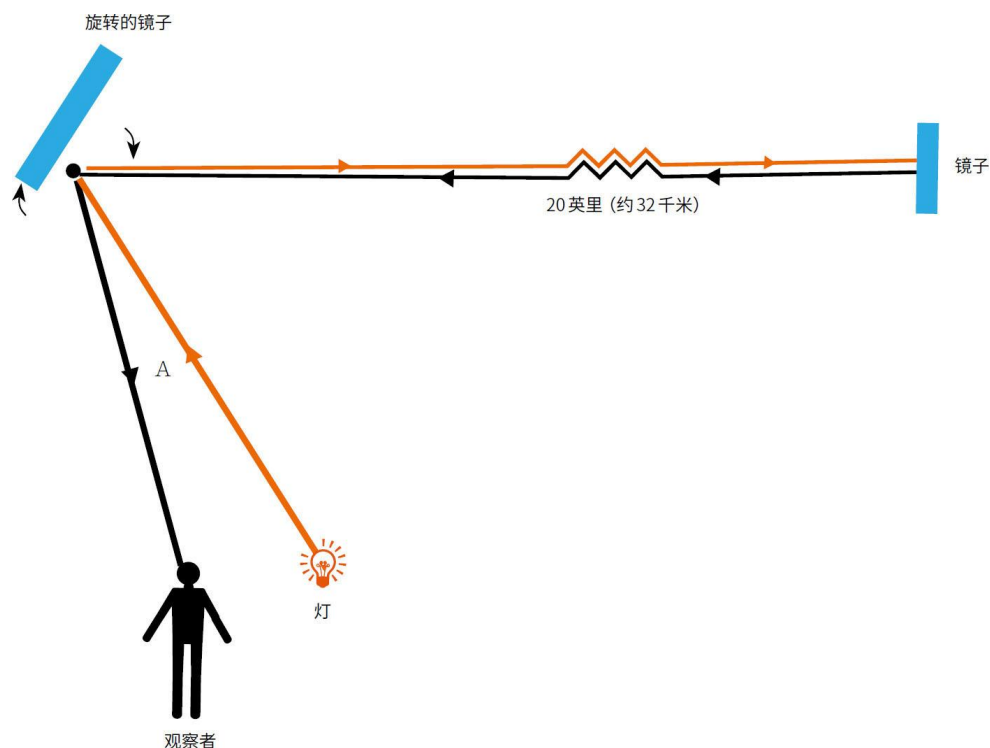


1849年的斐索实验

问题在于，光传播10英里（约16千米）只需要大约0.05秒，或者说50毫秒，所以遮板上的空缺需要排得很紧，而且遮板必须转得很快。无论如何，1849年，斐索成功计算出光的传播速度是194700英里/秒（约313000千米/秒），比我们今天的准确值高了大约5%。

与此同时，莱昂·傅科也放弃了医学课程，因为和年轻的查尔斯·达尔文一样，他发现自己晕血。1850年，傅科和斐索一起参军入伍，很快他们又设计了一套更巧妙的系统来测量光速。在这个实验中，光单程传播的距离长达20英里（约32千米），不过这次他们把静止的反射镜换成了一面高速旋转的镜子。

光传过40英里（约64千米）的距离被反射回来以后，由于镜子已经旋转了一定的角度，所以入射光和反射光之间会产生微小的偏离角，即示意图中的A角。镜子的旋转速度已知，代入测得的偏离角A，就能算出光速。他们最后得出的结果是185000英里/秒（298000千米/秒），与今天公认的光速值相差在1%以内。



1850年的斐索和傅科实验

水中的光速

-

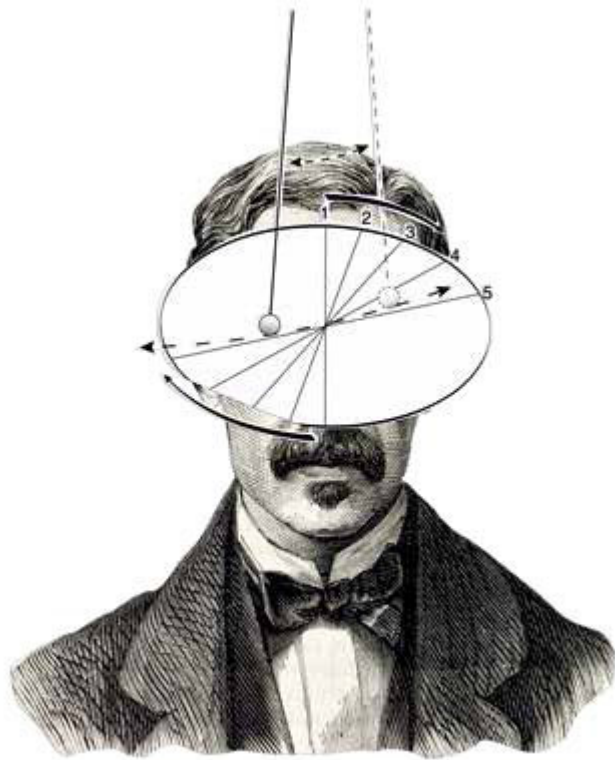
后来，傅科又改进了实验，他在光的路径上插入一根装满水的管子，结果发现，光返回花费的时间变长了。

牛顿曾经预测说，光在水中的传播速度应该比在空气中更快，因为稠密的介质会拉动光粒子，加快它的移动速度。但实际上，通过实验我们发现，水中的光速比空气中的光速要慢25%左右——只有140000英里（约225000千米）/秒。人们说，这个观测结果“敲下了粒子说的最后一根棺材钉”——托马斯·杨的理论终于得到了证实。

标准长度

-

1864年，斐索提出：“我们应该利用光波的长度来确定标准的长度单位。”现在我们将真空光速定义为299792458米/秒，所以“米”被定义为光在真空中花费 $1/299792458$ 秒经过的距离。实际上我们可以粗略地认为，光1毫微秒（十亿分之一秒）能传播0.3米，而声音传播1英尺需要花费大约1毫秒——比光慢了100万倍。



不过，光在水里的传播速度比在空气中慢得多，声音却恰恰相反。

傅科摆

-

1851年2月3日，傅科首次通过直观的方式证明了地球的自转。他用一根很长的链子将一个重摆悬挂在巴黎天文台里，然后邀请本地的所有科学家前来观看。后来，傅科又把重摆挂到了巴黎先贤祠的房顶上。我们站在地球上观察，会发现振荡的单摆在不停地旋转，但实际上，它的振荡平面相对于恒星却是固定的。这意味着地球在不停地自转，所以我们才会看到单摆的振荡平面出现旋转，这种单摆也可以用来计时。傅科摆看起来非常奇妙，十分适合向公众展示，所以美国和欧洲的许多大城市都装有傅科摆。

4. 光、射线和原子：1851—1914

物理学和技术常常密不可分。新理论会创造出新技术，而新的技术又为物理学家提供了新的实验途径和研究方法。17世纪，托里拆利发现的真空让人们发明了真空泵；利用真空泵，波义耳和其他科学家开始研究真空——或者说至少是极低气压——的性质。

1865年，赫尔曼·斯普伦格尔发明了水银泵，它的效果超越了以前所有的同类设备。利用水银泵，科学家得到了近乎完美的真空，于是威廉·克鲁克斯等人开始研究带电粒子在真空中的运动，最终他们发现了阴极射线、X射线和电子。

X射线的发现又点燃了放射性的火花，玛丽·居里在这个领域做出了杰出的贡献；在此基础之上，欧内斯特·卢瑟福开始研究各种放射性射线，并将它们分别命名为 α 射线、 β 射线和 γ 射线。 α 射线由沉重的粒子——氦的原子核——组成，卢瑟福用它轰击原子，探查原子的内部结构。 β 射线和阴极射线实际上是电子，而 γ 射线是能量最强的电磁波。

1887

研究人员：

阿尔伯特·A.迈克尔逊

爱德华·W.莫雷

研究领域：

宇宙学

结论：

“以太”并不存在

什么是以太？

地球与光以太的相对运动

海浪在水中传播，声波在空气（或者水）中传播，假如光也是一种波，那么它也应该有某种传播的介质。19世纪80年代以前，科学家一直这样认为，他们把这种介质称为“光以太”，也就是“光的传播介质”。

根据托里拆利和波义耳所做的实验，光可以在真空中传播，太空也无法阻隔光波，所以我们才能看见月亮、太阳和星星。因此，无论是在太空里还是在地球上的真空中，以太无所不在。可是，以太看不见也摸不着，它似乎也不会与行星和卫星产生任何摩擦。既然如此，以太真的存在吗？



地球在绕太阳的轨道上以大约67500英里/小时（约30千米/秒）的速度公转，与此同时，它也围绕地轴自转，那么以太可能相对于宇宙或太阳保持静止，也可能在太空中不停地运动，无论是哪种情况，以太相对于地球上任何一点的运动速度都一定非常快，于是迈克尔逊和莫雷决定设法测量“地球与光以太的相对运动”。

早期实验

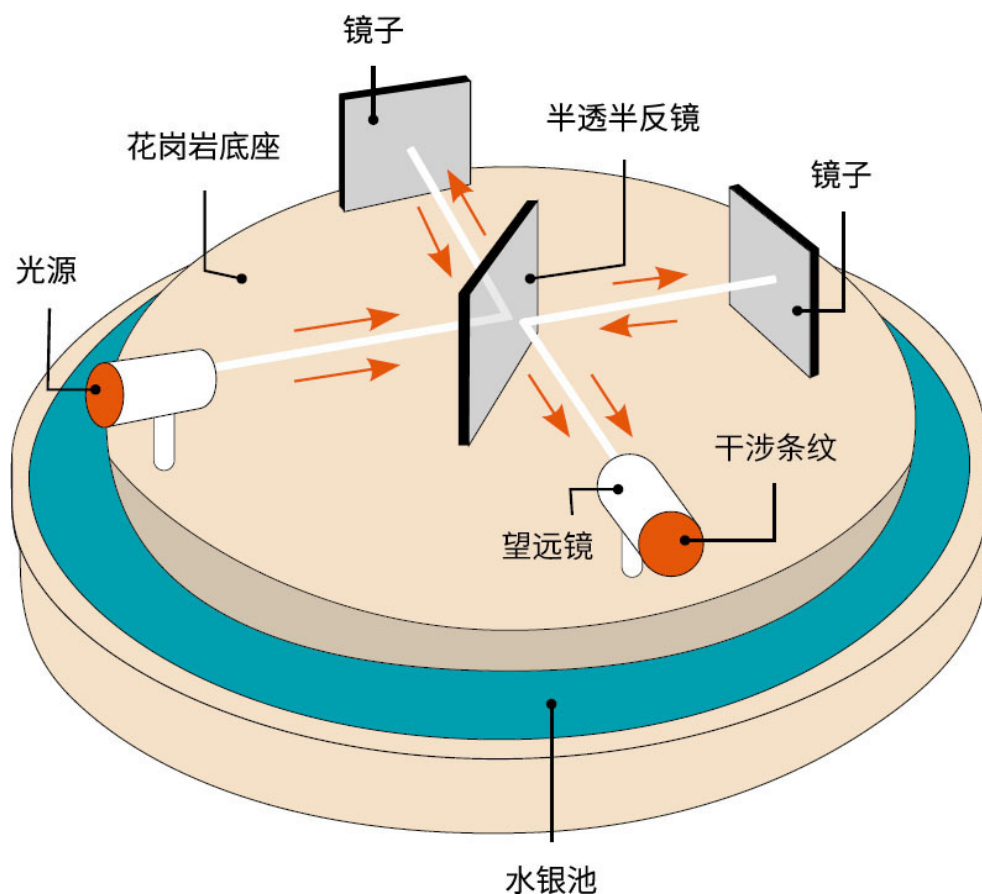
-

1881年，迈克尔逊在德国柏林展开了早期的实验，可街道上的喧嚣直到凌晨2点依然没有平息，外界的振动严重干扰了测量，实验设备的灵敏度也有所不足。尽管如此，迈克尔逊仍证明了自己的思路完全可行，他还发明了干涉仪。后来，迈克尔逊和莫雷一起改进了这台仪器，1887年，他们在如今美国俄亥俄州克利夫兰的凯斯西储大学合作完成了那个著名的实验。

干涉仪

-

一盏油灯的光被聚焦到一面镀了一半银的镜子（半透半反镜）上，于是一半的光直接穿过镜子，另一半则向左被反射90度。然后两束光分别被另一面镜子反射回来，回到半透半反镜时，两束光的行程都是36英尺（约11米）。随后，两束光同时射向一个望远镜，形成干涉条纹。



迈克尔逊和莫雷的干涉仪

但偶尔经过的马车和雷雨产生的振动仍会影响实验精度，所以迈克尔逊和莫雷把整套装置安装在一块重达3吨的石头底座上。然后，他们把底座放进一个水银池里，只要轻轻一拨，石头底座就会带着整套装置缓缓旋转。无论以太向哪个方向运动，在干涉仪旋转的过程中，总有一个位置会让某束光与以太的运动方向平行，而另一束光则与以太的运动方向形成一定角度。这样一来，两束光到达望远镜的时间应该出现些微的差别，导致干涉条纹向侧面移动。

他们的设想是这样的：光束A和光束B的传播方向存在夹角。如果光束B平行于“以太风”的方向，那么光束A就必然会穿过以太风，此时它经过同样光程花费的时间应该比光束B更少。

这就像在河里游泳，在距离相同的情况下，穿过河流游个来回肯定比顺流而下再逆流而上花费的时间更少。事实上，如果河水的流速比你游泳的速度快，那你根本不可能逆流游回起点。

1887年7月8日正午，两位研究者让整套装置稳定地旋转了6圈，每转动 $1/16$ 圈（ 22.5° ），他们就观察一次干涉条纹。同一天傍晚6点，他们重复做了一次实验。接下来的两天里，他们在同样的时间又做了几次相同的实验。

按照他们的预期，装置每转动一圈，应该有四个位置会出现条纹的偏移，其中两次应该偏向左边，另外两次则偏向右边，所以干涉条纹最终应该呈现“左——右——左——右”的运动规律。根据他们的计算，干涉条纹偏移量至少应该是仪器能测得的最小值的20倍。

世界上最著名的“失败”实验

-

事实上，在他们的实验中，干涉条纹完全没有出现任何偏移。迈克尔逊写信告诉瑞利男爵：“我们完成了测量地球与以太相对运动的实验，结果表明，二者之间似乎完全不存在相对运动。”

这是否意味着地球表面的以太处于完全的静止状态？或许它会随着地球一起旋转，就像地面上的树和建筑物一样。两位研究者提出：“也许在海拔较高的地方，比如说某座孤零零的山顶上，我们才能观察到以太与地球的相对运动。”

1895

研究人员：

威廉·康拉德·伦琴

安东尼·亨利·贝克勒尔

研究领域：

电磁波谱和放射性

结论：

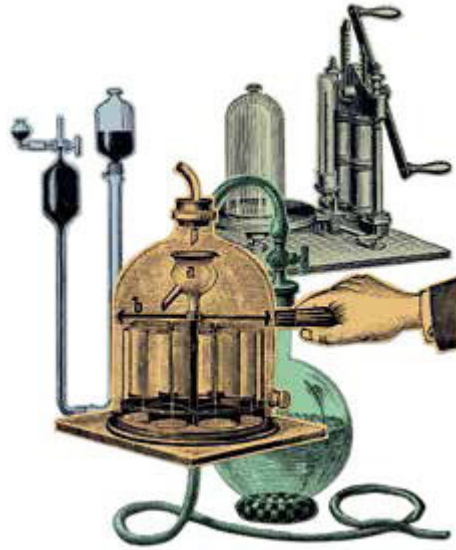
世界上有各种各样的电磁波；有的重原子不太稳定

X射线是怎样被发现的？

看见骨骼

19世纪90年代，英德两国的科学实验室里时常可以听见噼噼啪啪的爆裂声——还有更多声音来自近乎真空的奇怪管子。17世纪，科学家发明了真空泵，到19世纪，强大的真空泵已经能把玻璃管抽到近乎完美的真空，确切地说，管内气压大约只有标准大气压的百万分之一。

1838年，迈克尔·法拉第就曾注意到，低压玻璃管内的两个电极（正极和负极）之间会产生奇怪的弧光。1857年，海因里希·盖斯勒用更好的泵进一步降低了管内气压，这一次，电极产生的闪光几乎充满了整个管子，看起来很像是现代的霓虹灯。1876年，欧根·戈尔德斯坦发现，如果在真空管里放置一件固体物品，射线会在管子另一头投下它的影子。戈尔德斯坦将这种射线命名为“阴极射线”。后来，威廉·克鲁克斯用更高效的泵制造出了类似的闪光，不过他也注意到，阴极前方有一片奇怪的暗区——现在我们称之为“克鲁克斯暗区”。如果继续抽出管内的空气，暗区会从阴极弥漫到阳极，然后阳极背后的玻璃板开始闪烁。克鲁克斯认为，穿过玻璃管的阴极射线以某种方式穿透了阳极，直接撞击到玻璃板上，所以玻璃才会发光。



1895年11月8日星期五，维尔茨堡大学的物理教授威廉·伦琴打算用菲利普·莱纳德发明的一种管子做几个实验。莱纳德在真空管上开了一个小窗，然后在上面盖了一片铝箔，好让一部分阴极射线穿透到管外。出于某种原因，伦琴在铝箔窗附近放了一块涂有荧光材料（氰亚铂酸钡）的纸板，结果他发现，纸板发出了明亮的辉光，虽然周围显然没有任何光源。



然后，伦琴在完全黑暗的屋子里换了另一种管子继续做实验，他注意到房间对面某处发出了幽幽的荧光。伦琴点亮蜡烛，发现发光的

还是那块荧光板，他原本打算下一步再把荧光板放到真空管旁边，没想到它隔着这么远的距离居然也能发光。

我知道了！

-

激动万分的伦琴在实验室里待了整整一个周末，他反复做了无数次实验，最后终于确认，荧光真实存在，不是他自己想象出来的。伦琴不知道奇怪的荧光来自哪里，但它肯定与真空管内的射线有关，于是伦琴将这种射线命名为“X射线”（X的意思是“未知”），不过在很长一段时间里，人们一直叫它“伦琴射线”。

两周以后，伦琴拍下了第一张X射线照片——照片上是他的妻子安娜·柏莎的手。看到照片的时候，柏莎惊呼：“我看见了死亡。”那一年年底，伦琴将自己的实验结果写成了一篇论文——《论一种新射线》；1901年，这个发现为他赢得了有史以来的第一个诺贝尔物理学奖。伦琴没有为X射线申请专利，因为他希望每个人都能从中受益。

启迪

-

伦琴的论文问世还不到一个月，法国物理学家亨利·贝克勒尔就受到了他的启发，开始研究磷光材料硫酸钾铀的性质。荧光材料在接受光照时会发出辉光，但外界光线消失后，它的荧光也会随之消失，磷光材料则会吸收光线，哪怕切断外界的光源，它也会在黑暗中继续发

光。贝克勒尔认为，这种磷光材料可能也会释放X射线，或者其他某种类似的东西。

他用两片很厚的黑纸把一张感光底片裹了起来：

黑纸包裹的底片哪怕放在太阳下暴晒一整天也不会显影。接下来我在黑纸外面放了一张纸，将一片磷光材料放在上面，然后把它们放在太阳下晒了几个小时，结果，冲洗后的底片上出现了磷光材料留下的阴影。随后我又做了两次实验，一次我在磷光材料下面垫了一张钞票，第二次则把钞票换成剪了一个洞的金属片，最后得到的结果还是一样.....通过以上实验，我得出结论：这种磷光材料能够释放出某种射线，这种射线可以穿过不透光的黑纸，导致银盐底片感光显影。

放射性

-

不过后来贝克勒尔又发现，这种材料就算不经过太阳的暴晒，也一样能让底片感光。“于是我自然而然地想到，这种磷光材料应该会释放出一种看不见的射线，它的效果与莱纳德先生和伦琴先生研究的射线十分相似。”

1896年5月，这位科学家终于确认，神秘的新射线实际上来自磷光材料中的铀。贝克勒尔就这样出乎意料地发现了放射性。

1897

研究人员：

约瑟夫·约翰·汤姆森

研究领域：

原子物理

结论：

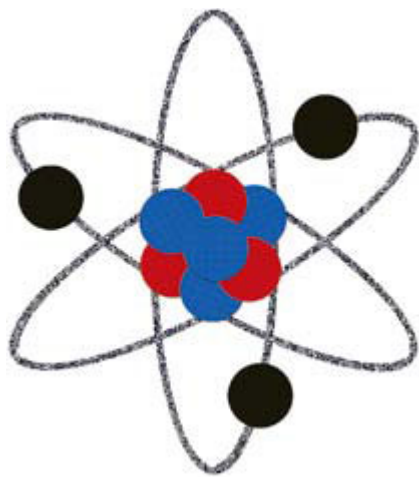
初探原子结构

原子里面有什么？

发现电子

19世纪90年代，物理学领域涌现出了大量重要发现，每一个新的实验和发现都会迅速引来诸多追随者。科学家如饥似渴地盯着同行的进度，同时也不吝于分享自己的思路。在那个时代，电灯才开始普及，汽车刚刚出现，但原子物理已经欣欣向荣。

1897年，在英国剑桥的卡文迪许实验室里，来自曼彻斯特的物理学家约瑟夫·约翰·汤姆森发现，原子很可能是由更小的粒子组成的。不过当时他认为，最小的亚原子粒子可能也有氢原子那么大，氢是最轻的一种元素（也是宇宙中含量最丰富的元素）。



早在1890年，阿瑟·舒斯特就曾提出，阴极射线带有负电荷，所以它在磁场和电场中会发生偏转。舒斯特推测，阴极射线的荷质比可能超过1000，但谁也不相信他的话。

阴极射线

-

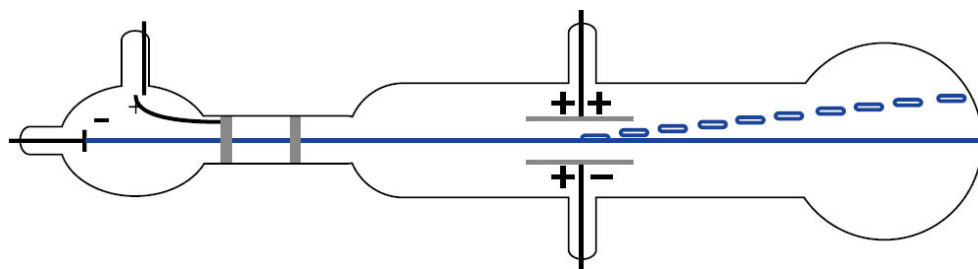
汤姆森也在利用真空管研究阴极射线，他注意到阴极射线能在空气中传播很长一段距离，如果组成射线的粒子体积和氢原子差不多，那么它根本不可能跑这么远。因为这么大的粒子必然会和空气中的氮分子和氧分子发生碰撞，但阴极射线似乎能从空气分子的缝隙中穿过去。

阴极释放的射线会向四面八方传播，不过汤姆森设法将它们聚成了一束，以便详细研究。汤姆森猜测，阴极射线束一定是由粒子组成的，因为它与热电偶碰撞时会产生热量。为了完成定量测量，汤姆森设计了一种管子：阴极释放出的射线穿过阳极进入一个钟形罩，罩子里放了一块画好网格的屏幕，阴极射线会在屏幕正中间生成一个明亮的光斑。

偏转射线

-

正常情况下，阴极射线沿直线传播，不过和舒斯特一样，汤姆森也同样发现，磁铁和强电场都会让阴极射线发生偏转，这说明射线束一定带有负电荷。根据阴极射线的偏转量，可以算出射线束的荷质比和射线中粒子的质量。



阴极射线在电场中发生偏转

计算的结果令人震惊：阴极射线的荷质比是氢离子（ H^+ ）的1000倍以上，这意味着组成射线的粒子质量还不到氢原子的千分之一（或者它携带的电荷极高）。此外，无论阴极射线来自哪种源（例如原子），射线中的粒子质量似乎都完全相同。汤姆森总结道：

“由于阴极射线在静电场和磁场中的运动轨迹和带负电荷的粒子一模一样，于是我只能得出唯一可能的结论：该射线由带负电荷的物质粒子组成。”

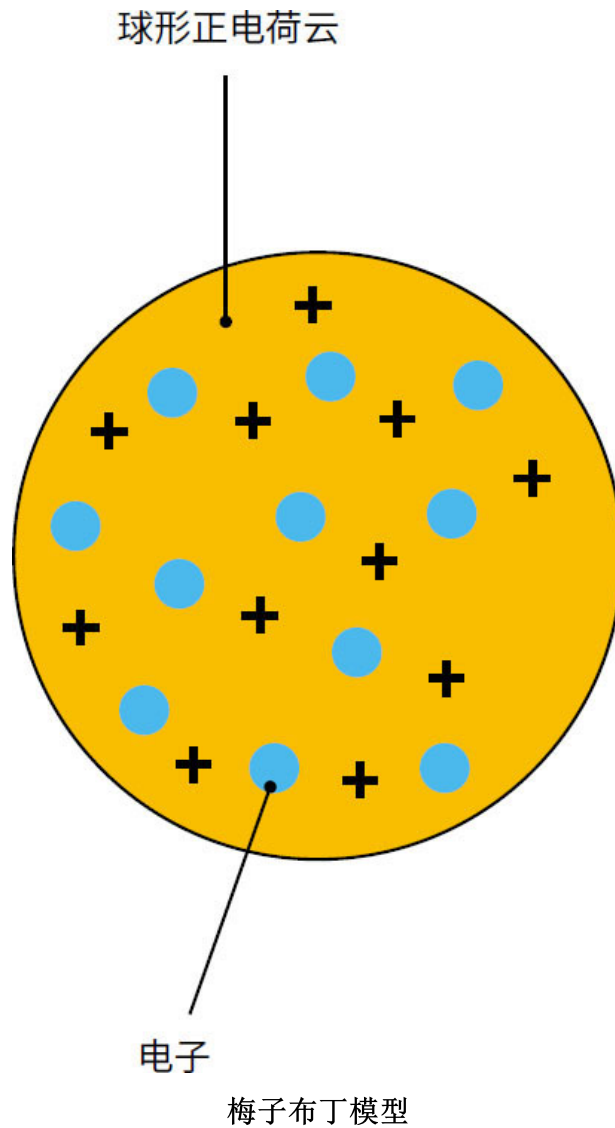
汤姆森把这些粒子称为“微粒”，不过人们很快就将它命名为“电子”。汤姆森认为，所有原子中都含有电子。1904年，他提出了原子的“梅子布丁模型”：原子是带正电荷的球体，小小的电子像梅子一样嵌在原子中，它们可能还会绕原子中心快速转动。

选错了专业？

-

汤姆森的父亲希望他成为一名工程师，但家里没有筹到足够的钱送他去当学徒，所以汤姆森去剑桥学了科学，最后成了一名物理学家。28岁时，汤姆森被任命为实验物理卡文迪许教授，即卡文迪许物理实验室主任，不少人对此不以为然。第一，他比其他候选者年轻很

多；第二，他在实验物理领域没什么建树，甚至还有点笨手笨脚。汤姆森的一位助手曾经写道：“J.J.（汤姆森）对自己的动手能力没什么自信，我觉得有必要鼓励他亲自操作设备！不过他很擅长阐述自己的思路，而且总能找到正确的方向。”



尽管汤姆森动手能力不强，但他却善于设计实验装置，同时也是个很好的老师。1906年，汤姆森获得了诺贝尔奖，这是卡文迪许实验室第二次获得这一殊荣。这个实验室前后出过29位杰出的诺贝尔奖得主，这实在是个了不起的成就。

汤姆森还和自己的学生弗朗西斯·威廉·阿斯顿一起研究过正离子（失去一个电子的原子）。1912年，这对师生成功地分离了不同的离子，因为它们的质量各不相同。他们的早期发现之一是，稀有气体氖拥有两种同位素——也就是现在我们所说的氖-20和氖-22。这两种原子的质子数完全相同，但中子数却不一样。汤姆森和阿斯顿设计的仪器后来逐步演化为质谱仪，它是化学家手中最强大有用的工具。

1898

研究人员：

玛丽·斯克沃多夫斯卡·居里

皮埃尔·居里

研究领域：

放射性

结论：

镭的发现开辟了放射性研究的新天地

镭是怎样被发现的？

放射性研究的先驱

玛丽·居里也许是有史以来最伟大的女性科学家。她的童年充满坎坷。19世纪的波兰不是民族主义者的乐土，在俄国人的统治下，玛丽一家的生活充满艰辛。不仅如此，俄国统治者还撤销了波兰学校里的实验教学课程。幸运的是，玛丽的父亲是一位物理教师，他把大部分实验设备都搬回了家里，所以他最小的女儿（他一共生了五个孩子）玛丽·萨洛美娅·斯克沃多夫斯卡才不至于完全得不到教育。

后来，玛丽设法去了巴黎大学继续学习，在那里，她遇到了皮埃尔·居里。皮埃尔当时是一名物理学和化学讲师，他在自己的实验室里为玛丽留出了一块研究天地。

铀射线

-

1895年末，科学家发现了X射线和放射性，玛丽（这是她的法语名）决定深入研究神秘的“铀射线”。



幸运的是，皮埃尔和他的兄弟发明了一种可以测量电荷的灵敏设备——静电计。玛丽发现铀射线能让周围的空气导电，所以她可以利用静电计来探测这种射线。

刚开始，玛丽研究了各种各样的铀盐，最终发现，射线的强度只跟铀的数量有关。于是她猜测铀射线并非出于分子的相互作用，而是来自铀原子本身的某种特性。

沥青铀矿是一种常见的含铀矿石。玛丽发现，这种矿石产生的射线是金属铀的四倍，所以她推测，沥青铀矿中一定含有某种活性远大于铀的物质。于是她开始寻找其他放射性材料。1898年，玛丽发现钍也会释放射线。

新元素

-

皮埃尔逐渐迷上了玛丽的实验，最后他决定加入她的行列。不过毫无疑问，在两人的合作中，玛丽始终占据着主导地位。

1898年4月14日，居里夫妇研磨并溶解了3.5盎司（约99克）沥青铀矿，希望找到那种新的高放射性材料。事实证明，他们当时太理想化了。1902年，他们研磨的矿石增加到了1吨。经过好几个月的艰苦工作，居里夫妇终于分离出了0.004盎司（约0.113克）氯化镭。

居里夫妇用硫酸溶解沥青铀矿来提取铀，实验中，他们发现，提取后的铀矿残渣依然具有放射性。由此他们设法分离出了一种类似铋的新元素——它在元素周期表中位于铋的后面，它的化合物性质也和铋的化合物十分相似。这是一种前所未见的新元素，为了纪念自己的祖国，玛丽将它命名为“钋”（“钋”全名Polonium，来自“波兰”的Po）。1898年7月，居里夫妇对外公布了这一发现。

抓住狡猾的镭

-

然后他们试着进一步分离剩余的残渣，于是又发现了另一种高放射性物质。它的性质和钡十分相似，而且它的化合物和钡的化合物混合在一起，很难分开，但钡燃烧时会产生明亮的绿色火焰，光谱中也有绿线，而这种新物质却会释放出神秘的红线，它一定是另一种新元素。

分离新元素和钡是一件非常困难的工作，玛丽和皮埃尔只能将它们转化为氯化盐，然后让它们慢慢结晶。新物质的氯化盐溶解度比氯化钡低一点点，所以它结晶的速度也比氯化钡要快一点点。居里夫妇必须用静电计测试搜集到的每一份样品，检验它是否具有放射性。也就是在这个过程中，他们创造了“放射性”这个词。

1898年12月21日，居里夫妇基本确定，这的确是一种新的元素。新元素的放射性极强，所以居里夫妇将它命名为“镭”。12月26日，他们向法国科学院报告了这一发现，虽然这时候他们尚未分离出纯净的镭。直到12年后，玛丽才终于分离出了纯净的镭。几年后，镭的化合物在欧内斯特·卢瑟福的研究中发挥了关键作用；今天，全世界的镭化合物年产量只有大约3.5盎司（约100克）。



全世界的认可

-

截至1902年，玛丽和皮埃尔一共发表了32篇科学论文。1903年，玛丽在获得博士学位后前往英国伦敦访问皇家研究所，但这个机构却不允许女性发表演讲，所以皮埃尔被迫上台替她发表演说，听众提问的时候，他就低头转问玛丽，玛丽回答以后，他又大声转告听众。

那年11月，玛丽、皮埃尔和亨利·贝克勒尔共同获得了诺贝尔物理学奖——她是第一位获此殊荣的女性。最初诺贝尔委员会只打算表彰

皮埃尔和贝克勒尔，但皮埃尔发现以后立即据理力争，于是委员会终于把玛丽的名字加进了名单。

1899

研究人员：

尼古拉·特斯拉

研究领域：

电学

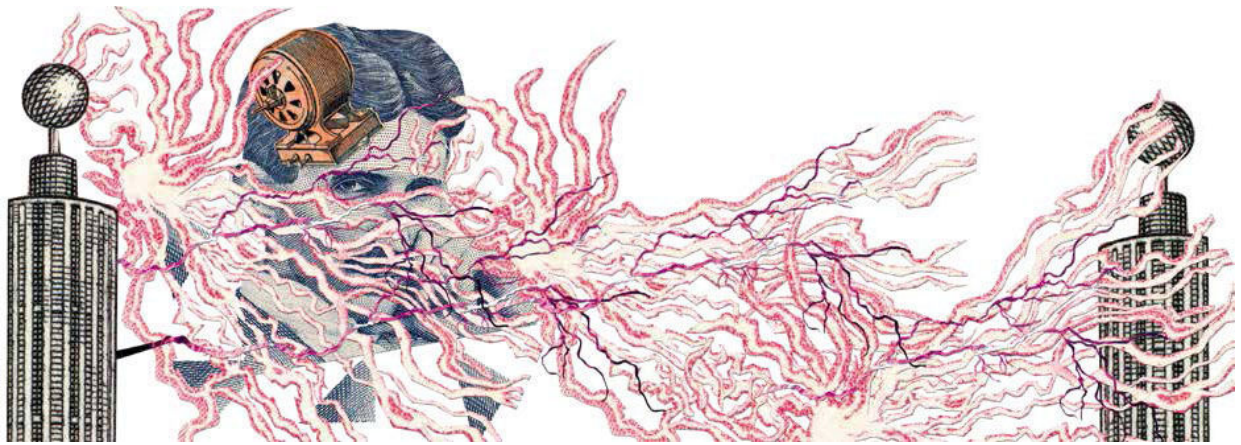
结论：

电能可以通过无线的方式传播

能量能在空间中传播吗？

无线传输能量

塞尔维亚裔科学家尼古拉·特斯拉出生在今天的克罗地亚境内，在学校里的时候，他就是个数学神童。为了逃离时常出现在脑子里的幻象，特斯拉离开了自己的家，前往奥地利工艺大学。他在学校里非常刻苦，然而不幸的是，年轻的特斯拉很快染上了赌瘾，连续有好几次考试不及格，于是他再次逃离学校，同时也和家人断绝了所有联系。特斯拉高大英俊，瘦得惊人，他或许就是人们印象中“疯狂科学家”的原型。



1884年6月，特斯拉前去纽约加入了托马斯·爱迪生麾下。不过第二年，因为爱迪生不肯兑现曾经答应过的奖金，特斯拉愤而辞职离开了爱迪生的公司。然后特斯拉设法说服了几位商人资助自己的研究，如果他的发明专利能有收益，投资人也将得到一部分利润。1888年，特斯拉与乔治·威斯汀豪斯签订了一份回报丰厚的合同。

1891年，特斯拉完成了他最著名的发明——特斯拉线圈。特斯拉线圈实际上是一种共振变压电路，可以产生超高压交变电流，直到今天，人们偶尔还会使用它。

无线输电

-

在1893年的芝加哥世界博览会上，威斯汀豪斯展出了“特斯拉多相系统”，一位参观者写道：“房间里悬挂着两个裹了一层锡箔的硬橡胶板，两块板子大约相距15英尺（约4.6米），导线把它们和变压器连接在一起。通电的一瞬间，两块板子之间的桌子上放的几个灯泡和房间里各处的灯泡都亮了起来，令人惊讶的是，这些灯泡与那两块板子之间没有任何电线。”

换句话说，特斯拉实现了无线输电。

1899年，特斯拉在科罗拉多的斯普林斯建立了实验室，因为他的多相交流系统就安装在这里，而且当地的朋友能为他免费无限量供电。在某次早期实验中，特斯拉制造出了一道长达5英寸（约12.7厘米）的电火花，这意味着当时电路中的电压大约高达50万伏特。

他刚开始用的是一组特斯拉线圈，在实验过程中，特斯拉不断增加电路中的电压，最终的电压高达400万到500万伏特。巨大的电火花仿佛人造的闪电，响亮的轰鸣声传到了15英里（约24千米）外。街上的行人发现自己脚底有火花跳跃，金属马蹄铁上传来的电流惊得驯服的马儿左冲右撞，屋里的电灯突然自顾自地亮了起来。特斯拉的实验甚至导致了一座发电站短路，造成当地大规模的电力中断。



特斯拉希望制造出“放大发射器”，实现无线电力传输，不过他对外谎称自己是在研究如何传输无线电信号。他曾经写道：“我对自己的所有发明都很有信心，我坚信，放大发射器必将福泽子孙后代。”

沃登克里弗塔

-

1900年，在约翰·皮尔庞特·摩根的资助下，特斯拉在长岛肖勒姆的沃登克里弗开始修建一座187英尺（约57米）高的铁塔，希望借助它实现跨越大西洋的无线电广播和电能传输。然而在高塔修建完工时，特斯拉已经没钱了，而摩根在1901年的股灾中损失惨重，他拒绝提供进一步的资助，于是特斯拉的计划胎死腹中。

特斯拉线圈是这位工程师最广为人知的发明，不过除此以外，他还申请了其他数十项专利，并发明了各种各样的电力设备，其中包括“利用电能对学生进行潜意识浸润教育，让笨孩子变得聪明起来”的项目。

现在，无线输电技术已经在某些领域投入了实际应用，人们主要用它来给各种设备充电：小到电动牙刷、剃须刀、心脏起搏器和智能卡，大到公共汽车和火车之类的电动交通工具，甚至包括磁悬浮列

车。科学家和工程师正在继续研制无线充电的手机、平板电脑和笔记本电脑。不过，特斯拉的梦想依然没有完全实现——至少是在目前。

1905

研究人员：

阿尔伯特·爱因斯坦

研究领域：

力学

结论：

与牛顿力学相比，狭义相对论能够更好地描述亚光速物体的运动

光速是恒定的吗？

$E=mc^2$ ：狭义相对论

如果能够乘着一束光旅行，你会看见什么景色？

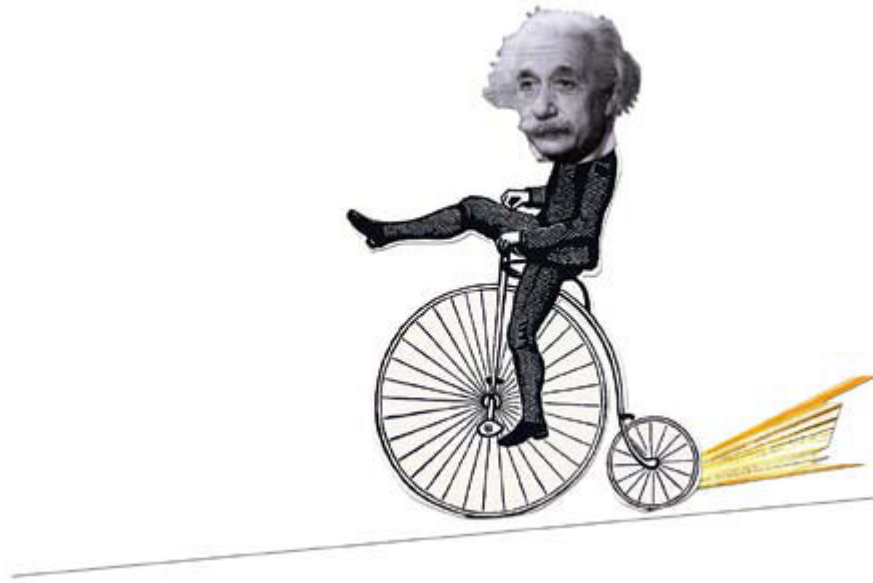
1879年3月14日，阿尔伯特·爱因斯坦出生在德国乌尔姆市。1894年，他随父母移居到了意大利，不过在1895年和1896年，爱因斯坦去了瑞士的阿劳市上学，他发现这里的教育方式比自己以前在德国上的学校先进轻松得多。很久以后，爱因斯坦在自传中写道：“学校里洋溢着自由的气氛，老师们诚挚认真，兢兢业业，这给我留下了难以磨灭的印象。”也就是在这段时间，年轻的爱因斯坦开始思考相对论。

狭义相对论悖论

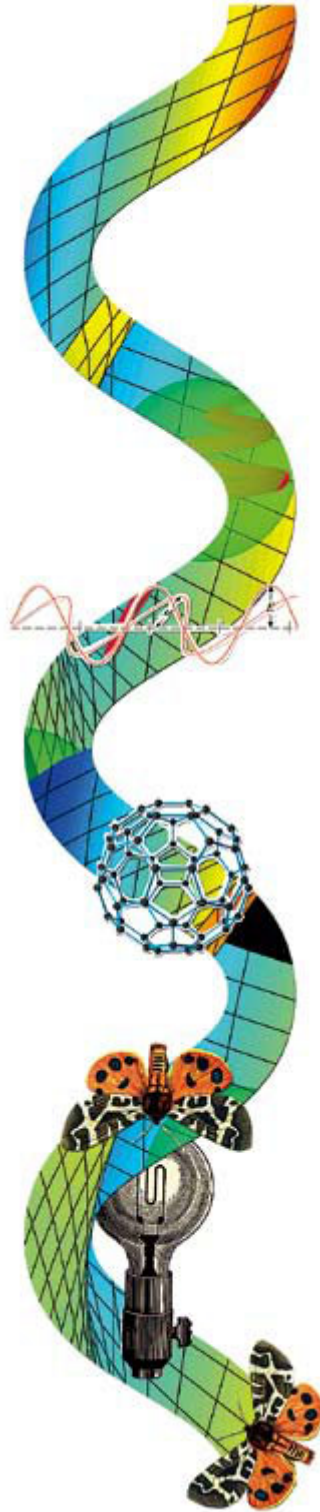
-

爱因斯坦在自传中提到了一个思维实验：

“……这个悖论早在16岁时就出现在我的脑海里：如果我以 c （真空光速）的速度追逐一束光，那么在我眼里，这束光应该是一个静止的电磁场，虽然它仍在空间中振荡。但是，无论是依据现有实验还是根据麦克斯韦方程组进行推算，这样的场景似乎都不可能存在。于是我直觉地想到，无论观察者是以光速旅行还是相对于地球静止，他观察到的现象都应该遵循同样的法则。既然如此，那么前一个观察者如何确定自己真的处于高速运动的状态下呢？狭义相对论就是在这个悖论中萌芽的。”



这是一个悖论。如果爱因斯坦能看见静止的光，那么他就应该知道自己正在（以光速）运动——但这违背了伽利略的相对性原理。



1632年，伽利略在《关于两大世界体系的对话》中提出，如果一位观察者坐在一条船甲板下面没有窗户的船舱里，海面上平静无波，

那么他根本无从判断船是否在移动。当然，如果船加速或者转弯，观察者可以通过自己受到的力做出判断，但在感觉不到力的时候，他无法确定船是在匀速直线运动，还是相对于水面保持静止。

爱因斯坦或许听说过迈克尔逊和莫雷的实验，他们证明了光速不受以太的影响。无论如何，爱因斯坦开始相信，光速是恒定不变的，它永远都是186291英里/秒，或者说299792458米/秒，即光速 c 。

这个结论是反直觉的。投掷类项目的运动员通常需要助跑，无论他投掷的是棒球、标枪，还是橄榄球，因为助跑会加快物体在空中飞行的速度。但光却不一样，光源的运动速度不会影响光速。手电筒射出的光以 c 的速度传播，无论这个手电筒是稳稳地握在你的手中，还是在火箭上高速运动。

在1905年发表的狭义相对论论文中，爱因斯坦还提出了另一个假设：同样的物理定律适用于所有的惯性系（任何做匀速直线运动的载体或空间）。

宇宙中根本不存在绝对静止的地方，所以也没有绝对静止的以太可供光束穿梭其间。万事万物都在相对于其他物体不断地运动。你或许觉得自己待在原地没动，可是相对于火星来说，你正在空间中高速旋转。

那又怎样？

-

根据这些设想推出的结论具有深远的意义。第一，不同惯性系下钟表的时间并不相同。如果我看见你以极快的速度呼啸而过，那么从

我的角度观察，你的钟应该走得比我的慢得多。

另外，某些事件在某位观察者眼中是同时发生的，但若是换了另一个惯性系下的另一位观察者来看，情况可能完全不同。

1905年被称为爱因斯坦的“奇迹年”，除了这篇论文以外，那一年他还发表了其他三篇论文：其中一篇探讨光电效应，这为他赢得了诺贝尔奖；另一篇研究液体分子的布朗运动；还有一篇讨论了质量和能量的关系，这是狭义相对论的直接衍生品，正是这篇论文为后来闻名世界的质能方程（ $E=mc^2$ ）奠定了根基。

1908年，爱因斯坦曾经的老师赫尔曼·闵可夫斯基重新阐述了狭义相对论，除了描述空间以外，他又加入了时间这一维度。起初爱因斯坦并不相信闵可夫斯基的四维时空理论，但是后来，他不但接受了这套理论，还以此为基础发展出了广义相对论。

爱因斯坦在1905年提出的理论被称为“狭义相对论”，因为在这套理论中，观察者必须处于惯性系下。如果牵涉到加速和引力，那就得用到广义相对论了。

1908—1913

研究人员：

欧内斯特·卢瑟福

汉斯·盖革

欧内斯特·马士登

研究领域：

原子物理

结论：

原子内大部分空间空无一物，中央是致密的原子核

世界为何大部分是空的？

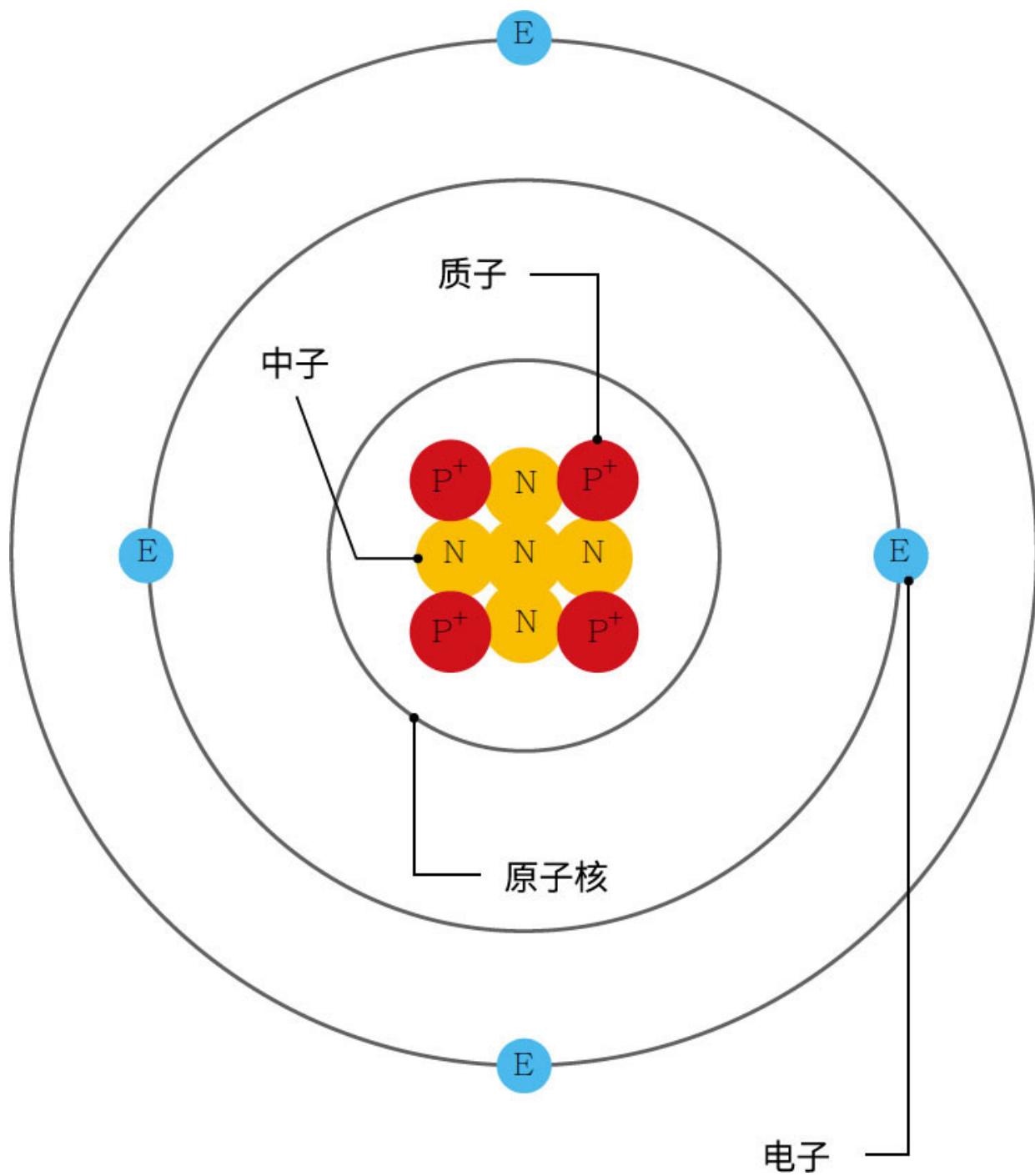
炮弹和面巾纸

“核物理之父”欧内斯特·卢瑟福是一位新西兰的农民之子，曾从师于约瑟夫·约翰·汤姆森。基于在加拿大麦吉尔大学所做的放射性衰变研究，他获得了1908年的诺贝尔奖。卢瑟福发现，放射性元素会释放三种“射线”，他将这些射线分别命名为 α 射线、 β 射线和 γ 射线。移居英国曼彻斯特以后，卢瑟福通过实验证明了 α 射线实际上是一种与氦原子核一模一样的粒子（现在我们知道，这种粒子由2个质子和2个中子组成，带有2个正电荷）。

原子结构

-

汤姆森曾经证明，电子是携带负电荷的微型粒子，他还推测说，原子的其余部分应该是一个带正电荷的球体，电子就嵌在这个球里——“梅子布丁模型”。



卢瑟福决定利用 α 射线轰击其他原子，探查原子的内部结构。他邀请了来访的德国科学家汉斯·盖革和盖革的学生欧内斯特·马士登一起来做这个艰苦的实验。

为了测量镭放射源释放的 α 粒子数量，卢瑟福和盖革制造了一个探测器，它的主体是一根充有空气的玻璃管，管内有一对电极。每个 α 粒子都会电离部分空气，产生一个电脉冲。这套简单的设备后来发展成了著名的盖革计数器。

α 粒子在空气中散射的程度令卢瑟福深感惊讶，于是他建议盖革和马士登用 α 粒子轰击其他材料，观察散射的情况。他们决定用金箔来做实验，因为这是一种单元素材料，而且非常薄。

首先，他们制作了一根6英尺（约2米）长的玻璃管，并在管子一端放置了一份镭的样品，它会释放出 α 粒子。管子中央有一条宽0.04英寸（约1毫米）的狭缝，只能允许极细的一束粒子通过。玻璃管另一端是一块荧光屏，如果遭到 α 粒子的轰击，它就会发光；几位科学家采用显微镜来记录闪烁的次数和闪烁点的分布范围。

金的散射

-

抽空玻璃管内的所有空气以后， α 粒子轰击产生的闪烁在屏幕上形成了一块狭窄清晰的光斑，但一旦充入空气，闪烁点分布的范围就会扩大很多，感觉就像对着一块聚乙烯板按亮了手电筒。如果抽空玻璃管内的空气，在狭缝另一侧放一片金箔，也会发生同样的事情。所以，空气分子和金原子都会让 α 粒子发生散射。

根据卢瑟福的计算，如果金原子是弥散式的正电荷球体，那么 α 粒子的方向只会出现极小的偏转，而且大部分粒子会直接从中穿过。所以实验中 α 粒子散射的程度才会让他大吃一惊，因此他提出，应该进一步寻找是否有粒子发生了大角度偏转。

大角度？

-

盖革和马士登设计了新的实验设备，他们在荧光屏前加装了一块铅板（它可以阻挡任何粒子），并调整了金箔的角度，让 α 粒子以大约 45° 的方向轰击金箔，结果两位科学家发现，粒子束有可能以近乎同样的角度被反射回来——就像你利用镜子观察墙对面的情况一样。而且他们还发现，金的散射作用比铝更强，后者的密度远小于金。

后来他们又做了一系列类似的实验，并根据实验结果推测，粒子的散射程度会受到几个因素的影响：（a）材料越厚、（b）原子越重、（c）粒子运动速度越慢，粒子束的散射就越明显，不过只有极少部分的粒子会发生超过 90° 的偏转。

这个结果让卢瑟福大感震惊，虽然他才是实验的提议者。在剑桥大学的一次演讲中，卢瑟福表示，这就像是你对着一张面巾纸射出一枚15英寸（约38厘米）的炮弹，结果炮弹居然被反弹回来打中了你。

“经过深思熟虑，我意识到，这种反弹散射一定是单次碰撞的结果；在计算过程中我发现，发生大角度偏转的粒子数量如此稀少，唯一的解释是，原子的大部分质量都集中在一个很小的原子核内。于是我想到，原子应该有一个微小致密的原子核，它携带正电。”

问题的关键在于，如果正电荷是均匀分布的，那么 α 粒子就不应该发生明显的散射，但是，如果携带正电荷的是一个很小的核，那么大部分粒子根本不会和它发生接触，只有一小部分粒子会迎面撞上它，就像棒球撞到球棒上一样。

所以卢瑟福推测，原子内部大部分空间是空的，中间是携带正电的极小的原子核，电子围绕原子核不断高速旋转。

1911

研究人员：

海克·卡末林·昂内斯

研究领域：

电学

结论：

某些金属在极低的温度下会变成超导体

金属在绝对零度下会表现出什么特性？

超导和低温之间的关系

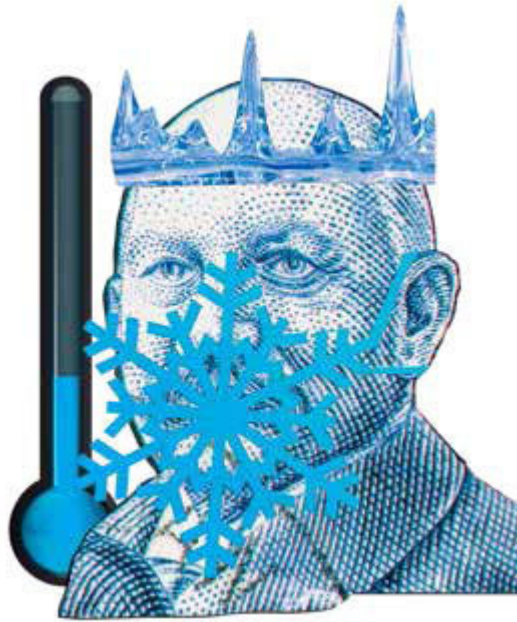
温度降到接近绝对零度时，就会发生一些奇怪的事情。罗伯特·波义耳曾经探讨过我们有可能达到的最低温度是多少，后来研究者发现，一定质量的气体在冷却过程中体积会稳步下降，由此计算可知，在温度下降到大约-455°F（约-270°C）时，气体的体积会减少到0。

焦耳提出热功当量方程以后，开尔文男爵根据热力学原理计算得出，绝对零度应该是-459.67°F（-273.15°C）。现在，绝对温度可以用开尔文温标（K）或兰金温标（R）表示，绝对零度是0K（0R），冰的熔点是273.15K（491.67R）。

低温学

-

1882年，荷兰物理学家卡末林·昂内斯成了荷兰莱顿大学的实验物理教授。1904年，他建立了一个大型低温实验室来研究低温物理。1908年7月10日，昂内斯在4.2K的低温下液化了氦气，抽去容器中残存的蒸气后，他成功得到了1.5K的超低温，创造了当时的世界纪录。



开尔文男爵认为，在如此低的温度下，金属的电阻会大幅上升，从而阻断电流。但昂内斯却不同意他的看法。1911年4月11日，昂内斯将一根固体水银导线浸入4.2K的液氢中，发现水银的电阻竟然降到了零。他兴高采烈地在笔记本（他的笔记直到一百年后才被破译出来）上写道：

“水银进入了一种新的状态，这种非凡的导电特性或许可以称之为‘超导状态’。”

昂内斯的重大突破引爆了其数十年的低温研究，科学家也得出了诸多具有实用价值的研究成果。比如说，大型强子对撞机就使用了96吨的氦来让1600块超导磁铁保持1.9K的低温。

达到绝对零度是个不可能完成的任务，但是在1999年，科学家成功地将一片金属铯冷却到了0.0000000001K，这已经相当接近绝对零度了。

液氮被冷却到2.17K以下时会变成超流体，这意味着如果你把它装在一个杯子或烧杯里，会有一层薄薄的液氮膜沿着杯壁向上“攀爬”，越过杯沿，最终所有液氮都会从杯子里“逃走”。这种现象被称为“昂内斯效应”。



1911

研究人员：

查尔斯·汤姆森·里斯·威尔逊

研究领域：

气象学和粒子物理

结论：

云室的发明带来了出乎意料的物理发现

把头探进云里就能获得诺贝尔奖？

云室和它带来的科学发现

威尔逊在山顶上看到的景象带来了粒子物理学的重大突破。作为一位苏格兰的农民之子，C.T.R.威尔逊本来打算学医，可是在剑桥上学的时候他迷上了物理，特别是气象学。

1883年，利用公开募集的资金，苏格兰气象学会在苏格兰威廉堡的不列颠最高峰、海拔4409英尺（约1344米）的本尼维斯山上修建了一座气象站。这里的气象员每小时都会记录降雨、风速、气温等数据，天气恶劣时，他们常常需要冒着生命危险完成工作。悲伤的是，政府拒绝提供资金来维护气象站，1904年，气象站被迫关闭。



气象站运营期间，他们有时候会在夏天雇用年轻的物理学家来工作几个星期，好让长期雇员有机会休个假。1894年9月，暑期工威尔逊高兴地来到了这里。

一天清晨，威尔逊站在山顶的制高点附近，脚下不远处就是一道陡峭的悬崖。当时他面朝西边，太阳在身后升起的时候，他看见自己的影子投射在脚下的云海上。然后突然之间，威尔逊看到了一道光晕，或者说一圈“佛光”——影子的头部周围绕着一道漂亮的彩虹。



眼前的奇景令威尔逊兴奋不已，他决定深入探查云的特性。不幸的是，作为学生，他很快就得回剑桥去，那里地势平坦，云也平淡无奇，所以威尔逊决定设计一个云室——他打算在烧瓶里制造人工云。

瓶子里的云

-

经过一系列失败的尝试，威尔逊成功做出了一套人工制云设备。他在一个玻璃大烧瓶里装满潮湿的空气，然后迅速降低瓶内气压，于是空气中的水蒸气很快达到了过饱和，瓶内开始形成少量水滴，水滴的核心可能是空气中的尘埃。但威尔逊失望地发现，这套设备根本无法制造出他感兴趣的那种云，不过他很好奇，电离的空气分子是否会在瓶中形成云迹。



1895年末，伦琴发现了X射线；1896年初，威尔逊试着将X射线引入云室，结果烧瓶内立即出现了大量浓雾。多年以后，他写道：“我还清晰地记得自己当时的喜悦。”显然，X射线电离（剥夺部分分子的电子，留下带正电的离子）了部分空气，这些离子为水蒸气提供了凝结核。

接下来的几年里，威尔逊又做了一些研究。从1900年到1910年，他一直忙于教学工作。不过在1910年，威尔逊又写道：“关于 α 射线和 β 射线的想法正在变得越来越清晰，我开始考虑这样的可能性，是否可以利用这些粒子电离空气凝结水汽形成的云迹来拍摄记录粒子的轨迹……”

1911年初，威尔逊重新开始琢磨云室，他发现，带电粒子的确会在烧瓶中留下云迹，就像飞机在空中留下尾迹一样。人类第一次用肉眼看到了粒子的运动轨迹。很快威尔逊就成功拍摄了单个原子和 α 粒子的运动轨迹。他说，电子会形成“一束束纤细的云丝”。

最惊人的发现

-

1923年，威尔逊终于完善了云室的设计，并成功拍摄了两张漂亮的电子轨迹照片。这引发了全世界的兴趣，很快云室就进入了巴黎、列宁格勒、柏林和东京的实验室。云室让科学家发现了正电子，也让

人们直观地看到了电子和正电子的湮灭现象，以及原子核的裂变和聚变。除此以外，云室也是科学家研究宇宙射线的重要工具。卢瑟福表示，云室是“科学史上最新颖、最精彩的设备”。

1927年，C.T.R.威尔逊获得了诺贝尔物理学奖，为了表彰他找到了“通过水蒸气的凝结来显示带电粒子运动轨迹的方法”——虽然他发明这种设备完全是出于另一个风马牛不相及的原因。威尔逊自己曾经写道：“毫无疑问，1894年9月我在本尼维斯山待的那两个星期中观察到的现象引领了我毕生的科研工作”。

1913

研究人员：

罗伯特·安德鲁斯·密立根

哈维·弗莱彻

研究领域：

粒子物理

结论：

电子携带的电量是 1.592×10^{-19} 库仑

如何测量粒子携带的电荷？

测量电子

1897年，约瑟夫·约翰·汤姆森发现了电子，并测量了电子的荷质比，但当时谁也不知道电子的确切质量和电量,所以，如果能够测量电子携带的电量，我们就能算出它的质量。

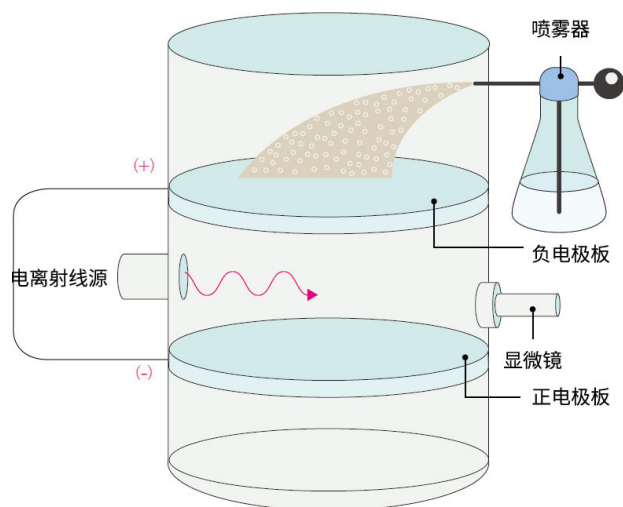
1910年，罗伯特·密立根成了芝加哥大学的教授，不过在此之前，他已经开始了自己的油滴实验。在研究生哈维·弗莱彻的帮助下，密立根设计制造了这套实验装置，它的原理其实非常简单。

测量微量电

-

利用香水喷雾器，科学家将细小的油滴喷入观察室上方的容器里，然后通过显微镜观察油滴在空气中坠落的速度。

然后他们向容器内射入一束X射线，这种射线会电离容器内的部分空气，剥夺部分空气分子的电子，让它变成带正电的离子。如果离子化的分子与油滴发生碰撞，那么正电荷会被转移到油滴上。这不会影响油滴受到的地球引力，不过下一步，科学家会给容器施加一个电场。



测量单个电子的电量

观察室上下方各有一块金属板，最高可施加5300V的电压，下方的金属板是正电极，上方则是负电极。电场会对油滴施加一个与重力方向相反的力，推动它向上远离正电极板，靠近负电极板。研究者可以观察油滴是继续坠落、保持静止,还是向上运动，并测量它的运动速度。

研究者并不知道每一滴油携带了多少电荷，但他们推测电荷应该存在一个基本单位，因此每一滴油携带的电量都应该是这个基本单位的倍数——可能是2倍、4倍或5倍。

他们知道空气的黏度、每次试验时的气温以及黏度对极小液滴的不同影响。因此，根据油滴下降的速率，可以算出每一滴油的有效重量。

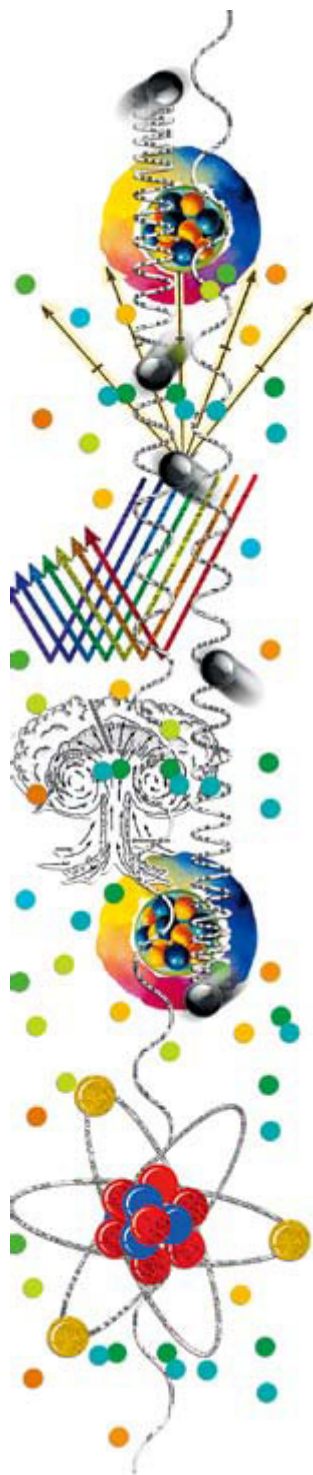


电场

-

然后，研究者接通电路，小心地调整电压，使液滴悬浮在空中。这项工作进展缓慢，难度极大。实验中，他们一共研究了58滴油，有时候单单一个油滴就需要观察5个小时。油滴保持悬浮状态时，它受到的重力正好等于电场力，而电场力可以通过此时的电压计算得出。知道了油滴的重量，就能算出它携带的电量。

然后研究者升高电压，看着油滴“向上坠落”。根据油滴的运动速率，可以再次验算它的电量。



综合多次实验的计算结果，他们最终得出结论：电荷的基本单位一定是 $1.592 \times 10^{-19} \text{C}$ ——我们今天公认的数值是 $1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ ，密立根

和弗莱彻的结果与这个值的误差小于百分之一。之所以会出现这样的误差，很可能是因为他们采用的空气黏滞系数有所偏差。

发现

-

这个结果非常重要，原因有几个。第一，它确认了电荷由离散的基本单元组成，而不是托马斯·爱迪生等人猜测的连续变量。

第二，如果这个数值就是最小的电量基本单元，那么它一定就是单个电子携带的电量。

第三，它帮助我们测量了阿伏伽德罗常数，这个常数的名字来自意大利科学家阿梅代奥·阿伏伽德罗。1811年，阿伏伽德罗提出，在给定的温度和压力下，任何气体的体积都与它包含的粒子（原子或分子）数量成正比。阿伏伽德罗常数的数值为 6×10^{23} ，即0.035盎司（约1克）氢、0.42盎司（约12克）碳、0.52盎司（约15克）氧或1.98盎司（约56克）铁包含的原子或分子数量。

密立根在计算最终结果时排除了大约一半的实验数据，这引发了一些争议。这样的数据篡改并不明智，它可能最终走向彻底的学术欺诈。事实上，这些数据不会改变密立根的计算结果，但会增大整个实验的统计误差。

不难想象，通过显微镜观察油滴这项枯燥冗长的工作主要由研究生哈维·弗莱彻承担，但在一份不同寻常的协议中，他与密立根达成了交换默契：密立根独享这篇论文的所有权益，而弗莱彻则是另一篇相

关论文的唯一作者，那是他的博士论文。结果，弗莱彻得到了博士学位，而密立根获得了1923年的诺贝尔物理学奖。

密立根不相信爱因斯坦在1905年的论文中提出的光电效应，他做了很多高难度实验，试图证明爱因斯坦错了，但结果却适得其反。他说：“我花了十年时间试图推翻爱因斯坦在1905年提出的等式，结果却事与愿违。到了1915年，我不得不承认，爱因斯坦的理论是对的，尽管它看起来很不合理。”



1914

研究人员：

詹姆斯·弗兰克

古斯塔夫·路德维希·赫兹

研究领域：

量子力学

结论：

量子力学理论首次得到了实验证明

量子力学比我们想象的还要古怪吗？

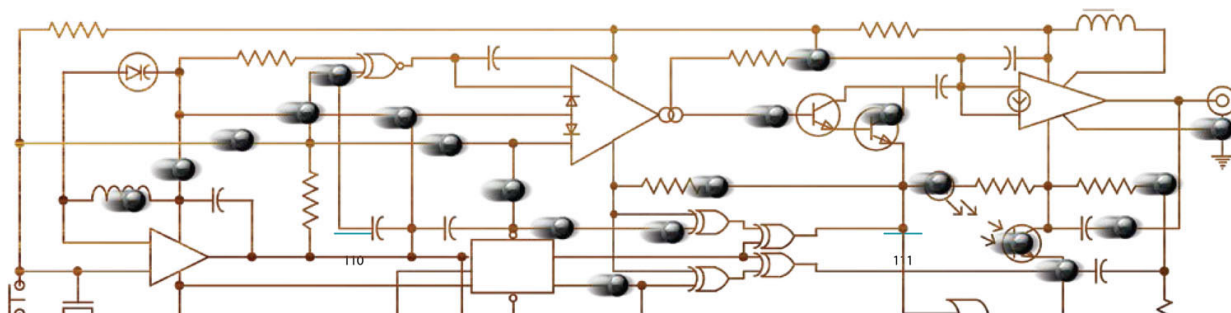
量子跃迁

飘浮的水银原子会对飞行的电子产生什么影响？弗兰克和赫兹在柏林大学合作研究这个问题。1914年4月14日，这两位科学家在联名发表的第一篇论文中描述了自己如何引导阴极产生的电子沿着真空管穿过金属网栅流向阳极。

电子携带负电荷，所以带正电的网栅会吸引电子，随着网栅的正电压不断升高，电子运动的速度也会不断加快。阳极的电势略低于网栅，所以只有运动速度够快的电子才能成功到达阳极，其余的则会被网栅吸附回去。

真空管内有一些水银蒸气，研究者在管子里放了一滴水银，然后把管子加热到239°F（115°C）。因此，穿过真空管的电子很容易与管内飘浮的水银原子发生碰撞。

研究者测量了到达阳极的电流，结果发现，随着网栅的电压不断升高，到达阳极的电流也稳定增长，直到电压升高到4.9V，电流突然下降到了接近零的程度。这意味着电子的运动速度稳步增长到了430万英尺/秒（约131万米/秒），然后突然停了下来。



然后研究者继续增加网栅的电压，电流重新开始增大，直到电压达到9.8V（也就是 $2 \times 4.9\text{V}$ ），电流再次出现断崖式下降；而在电压增加到14.7V（ $3 \times 4.9\text{V}$ ）时，同样的一幕再次上演。

显然，电子似乎只会失去4.9电子伏的能量，不多也不少。超过临界速度的电子会失去4.9电子伏的能量，然后继续运动。弗兰克和赫兹指出，4.9电子伏正好符合水银原子在254纳米（nm）上的一条谱线。

这是怎么回事？

-

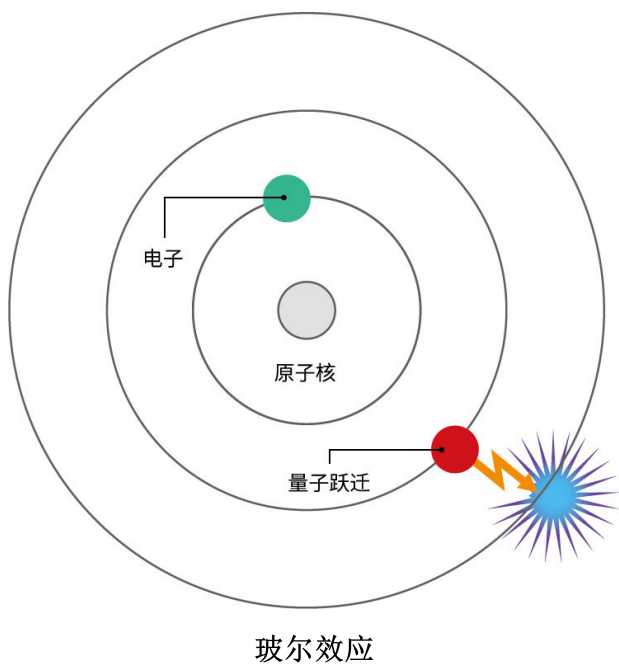
起初弗兰克和赫兹推测，飞行的电子可能电离了水银原子，不过尼尔斯·玻尔认为，他的新原子模型可以解释这个现象。实际上，玻尔在前一年就已发表了新原子模型的论文，但弗兰克和赫兹并未看到这篇文章。

在此之前，J.J.汤姆森的“梅子布丁”模型已经被卢瑟福的新模型取代，卢瑟福认为，原子中央是一个致密的原子核，其余大部分空间空无一物，电子可能围绕原子核高速运动。但这个模型有个严重的问题：高速运动的电子应该会发光，但科学家并未观测到原子发光。另外，带负电的电子理应冲向带正电的原子核，但实际上它们却没有。

持续的能量流？

德国物理学家马克斯·普朗克曾经提出，能量可能不是连续的能量流，而是离散的“小包裹”，或者说“量子”。在1905年的光电效应论文中，爱因斯坦曾证明了光的确以量子的方式传播。

哥本哈根的尼尔斯·玻尔认为，电子可能也存在类似的现象。因此，他提出了新的原子模型，电子的确围绕原子核做高速运动，但每个电子都有固定的能级（玻尔称之为“定常轨道”）。最低能级的轨道最多只能容纳2个电子，它们只能在自己的定常轨道上运行，无法再靠近原子核，下一个能级的轨道最多能容纳6个电子，以此类推。所有能级都是量子化的——每条轨道都有特定的半径和能量，就像光量子一样。



电子可以吸收一定的能量，跃迁到较高的能级（如果这条轨道上有足够的空间）；而当它跌落回原来的能级时，又会释放出等量的能量。玻尔指出，弗兰克和赫兹观察到的4.9电子伏正是水银原子两个量

子能级之间的能量差。他们的实验之所以会出现这样的结果，很可能是因为水银原子内部的电子被激发到了更高的能级。

玻尔还提出，这些电子跌落到原来的能级时，应该会释放出波长为254nm的紫外线。

1914年5月，弗兰克和赫兹在第二篇论文中报告说，在他们的实验条件下，水银释放出的光波长几乎正好就是254nm，这说明被激发的原子回归了“基态”。

解释实验结果

-

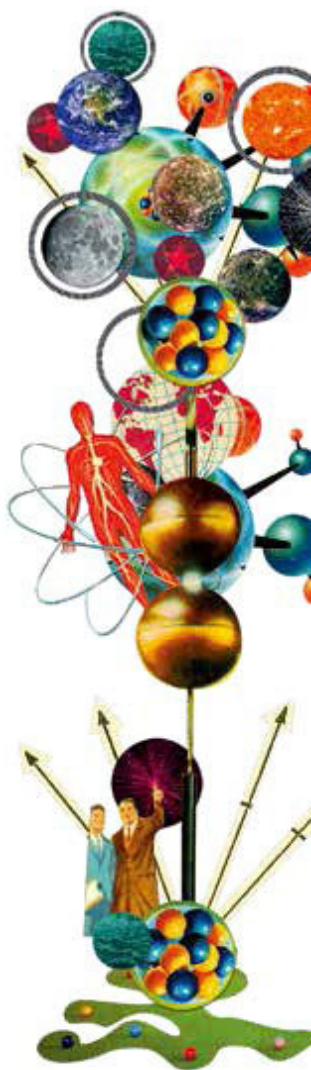
现在，最初的实验结果看起来似乎有了一些眉目。水银原子中的电子只能被4.9V以上的电压激发，因为在水银原子内部，被占满的量子化能级与下一个空能级之间的最小能量差就是4.9eV。

电压低于4.9V时，电子与水银原子碰撞后只会发生反弹，然后继续向着网栅和阳极运动。一旦电压达到4.9V，大部分电子会带着足够的能量冲击水银原子，激发原子内部的电子。与此同时，原来的电子就会失去能量，速度变慢，无法到达阳极，所以科学家测得的电流几乎降到了零。

电压达到9.8V时，每个电子几乎都会连续撞击并激发两个水银原子，然后失去能量无法继续运动，所以电流再次降到了零。

随着被激发的电子跌落回原来的量子能级，水银原子很快就会释放出波长254nm的紫外线。

于是，新兴的量子力学理论找到了第一个实验证据。几年后，弗兰克就这些实验结果发表了一次演讲，据说爱因斯坦在听完演讲后评论说：“这太可爱了，简直催人泪下。”他们的实验证明了电子可以在某条轨道上突然出现或消失，完全没有中间的运动过程，就像火星突然跳到了一条新的轨道上，然后又悄然回归它原来的轨道，这就是著名的“量子跃迁”。



5. 物质深处：1915—1939

据说在19世纪末，物理界的大佬之一，开尔文男爵曾说过一句话：“现在物理学领域已经没有什么新东西可供我们去发现了。”然而就在那之后的短短几年间，狭义相对论和量子力学改变了世界。

进入20世纪以后，物理学变得古怪起来。1915年，爱因斯坦让人们看到，引力可以扭曲时空；卢瑟福实现了炼金术士的梦想，将一种元素转化成了另一种；还有一位比利时神父提出，原初的宇宙是从一只蛋开始的。

法国贵族物理学家路易·德布罗意提出了一个惊世骇俗的观点，他认为电子可能也会表现出波的特性。贝尔实验室的戴维森和革末证明了德布罗意的理论：电子具有波粒二相性。然后，保罗·狄拉克预测了反物质的存在；1932年，卡尔·安德森在加州理工学院发现了反物质。

科学家追求“越来越高的测量精度”，但海森堡却证明了在原子层面上，我们不可能同时精确测量物质的位置和速度。物理学永远充满了不确定性。

1915

研究人员：

阿尔伯特·爱因斯坦

研究领域：

广义相对论

结论：

引力会影响时钟和光

引力与加速度有关吗？

爱因斯坦的广义相对论

请想象一下，如果你在电梯里扔下一只西红柿，但就在你放手的那个瞬间，电梯的缆绳断了，电梯会带着你和西红柿一起向下坠落，此时此刻，电梯、你和西红柿的坠落速度相同，所以西红柿将会停留在原地——也就是你的手边——因为你们都在做自由落体运动。

绕地轨道上飞船里的宇航员也处于自由落体状态。他或许会感觉到失重，但实际上，作用在宇航员和飞船身上的引力正好可以让他们停留在地球轨道上。如果他试图扔下一只西红柿，那么就会出现前述坠落电梯里的那一幕——西红柿会飘浮在他手边。

火箭发动机点火时，宇航员会感觉到有一股力量将自己压向飞船下方，就像在地球上起飞时他感受到的强大引力一样。事实上，引力的作用效果和加速度一模一样。



在地球表面保持静止



在火箭上

这就是爱因斯坦的“等价原则”。

加速度和钟

飞船尾部有一台奇怪的钟——它实际上是一盏频闪灯，每秒钟闪烁十次。如果飞船保持静止，水平地停放在地球上，那么灯发出的闪光也会以每秒十次的频率到达飞船的船头。但是，如果飞船在宇宙中加速运动，那么在船头观察到的闪光频次就会变慢。船尾发出的闪光依然是每秒十次，但是在相邻的两次闪光之间，飞船的速度会变快一点点，所以闪光需要花费更长的时间才能到达船头，所以到头来，你在船头观察到的闪光可能只有每秒九次。

这样一来，在这个具有加速度的参考系（飞船）下，在船头的观察者看来，船尾的钟就变慢了。信号受到了引力红移的影响。

因为加速度和引力具有相同的效果，所以时钟在强引力场中也会变慢：这就是所谓的“引力时间膨胀”。

相反地，如果频闪灯位于飞船船头，在加速度或引力的作用下，船尾的观察者会觉得它变快了——这种现象叫作引力蓝移。

1915年，爱因斯坦发表了引力频移理论的论文，他的理论得到了多个实验的验证。

利用原子钟

-

1971年10月，物理学家约瑟夫·哈菲尔和天文学家理查德·基廷做了另一个更富戏剧性的实验。他们将四座超高精度的原子钟分别放在全世界的四个商业航班上，第一个航班向东飞行，第二个向西，以此类推。然后，他们比较了飞机上的时钟与美国海军天文台（USNO）的原子钟显示的时间。

美国海军天文台相对于地球参考系保持静止，根据广义相对论，飞机上的所有时钟都应该比地面上的走得快，因为在3万到4万英尺（约9000~12000米）的高空中，它们受到的引力比地面上的小。

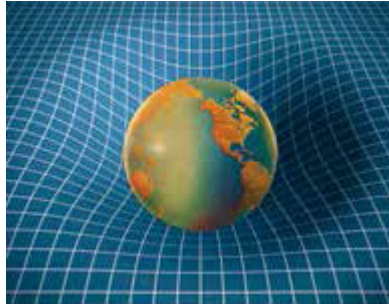
与此同时，根据狭义相对论，向东飞行的时钟与地表的运动方向相同，所以它应该比地面上的时钟运动的速度更快，因此它走的速度应该比地面上的时钟慢；根据同样的道理，向西飞行的时钟比地面上的运动速度慢，所以它应该比地面上的钟走得快。广义相对论与狭义相对论的效应叠加，科学家最终计算得出，向东飞行的时钟应该比USNO的原子钟慢50纳秒（一纳秒等于十亿分之一秒），而向西飞行的时钟则要比USNO的钟快275纳秒，结果他们发现，事实果然如此。

引力和光

-

想象一下，我们的宇航员乘坐飞船在轨道上运行。他们都处于自由落体状态，所以飞船本身是一个惯性系。宇航员在飞船左侧向右射出一支箭，击中对面墙壁上的靶子。但是，如果在他松开弓弦的那个瞬间，发动机点火加速，那么飞船会向前运动，箭也会脱靶扎在墙上更靠近船尾的位置。

如果宇航员射出的是一束激光，也会发生同样的事情。在自由落体状态下，光是直线传播的，但是如果受到加速度的影响，光会被弯曲，要是加速度足够大，激光也会“脱靶”。



因为引力场与加速度等效，所以引力也会弯曲光束。如果宇航员射出激光的时候，飞船还停留在发射场上尚未点火，那么这束光会在地球引力的作用下向下弯曲，虽然弯曲的程度可能细微得让你根本无法觉察。

爱因斯坦提出了一个震惊世界的新想法：引力其实并不存在。实际上，在地球这样的大质量物体附近，时空本身出现了扭曲，所以在没有外力作用的情况下，飞船和宇航员不是像牛顿定律预测的那样做直线运动，而是绕地球轨道飞行。

1919

研究人员：

欧内斯特·卢瑟福

研究领域：

原子物理

结论：

元素可以发生转化，但铅却不能变成金子

你能把铅变成金子吗？

元素转化的局限

运用 α 粒子（即氦原子核）证实了新的原子结构以后，欧内斯特·卢瑟福又开始利用同样的武器把氮转化成氧。

他注意到 α 粒子无法在空气中传播太远的距离，他还发现，这种粒子与空气分子碰撞时会释放出某种奇怪的辐射，导致“远在 α 粒子传播范围外的硫化锌屏幕闪烁频次上升。引起屏幕闪烁的高速运动原子携带正电荷，能够被磁场偏转，它的传播范围及携带的能量与 α 粒子在氢气中穿过时产生的高速氢原子十分相似”。

“强辐射源镭C被放置在一个长约1.2英寸（约3厘米）的金属盒子里，盒子一侧的开口上蒙了一层银板，它的阻滞作用约等于2.4英寸（约6厘米）厚的空气。硫化锌屏幕安装在银板后大约0.04英寸（约1毫米）处，这样科学家可以在银板和屏幕之前放置一块具有吸附作用的箔纸……金属盒内部的空气被抽空……如果向盒内充入干燥的氧气或二氧化碳，屏幕上出现的闪烁频次会明显下降，下降程度符合该气体所应该具备的阻滞作用。但是，我们注意到了一个奇怪的现象：如果向盒内充入干燥的空气，屏幕的闪烁频次却会不降反升。整套装置的总吸收率大约相当于7.5英寸（约19厘米）厚的空气时，屏幕上的闪烁频次变成了真空时的2倍。在实验中我们清晰地看到， α 粒子穿过空气时会导致长程闪烁频次增加，其亮度和氢原子产生的闪烁差不多。”



卢瑟福已经知道，氧气不会产生这种奇怪的闪烁，而空气主要成分是氧气和氮气，所以，看起来这种奇怪的辐射来自 α 粒子和氮气分子的碰撞。

轰击氮原子

-

于是，卢瑟福尝试用 α 粒子轰击纯氮，结果在轰击后的气体中发现了氢原子核。现在我们可以叫它氢离子或者质子，但是在当时，质子尚未被发现或命名，所以卢瑟福才会叫它“氢原子核”。这些粒子一定是氮原子核被轰击后分裂出来的。

卢瑟福认为：“……难免会得出这样的结论： α 粒子与氮气碰撞产生的这些长程原子并不是氮原子，却很可能是带电的氢原子……如果事实真的如此，我们只能推断，氮原子在与高速 α 粒子的近距离碰撞中发生了分裂，由此产生的自由氢原子是氮原子核的组成部分。”

换句话说，卢瑟福的实验结果表明，氢原子核是氮原子核的组成部分，而且它可能也是所有原子核的组成部分。这看起来似乎真的有点道理，因为氢是最轻的元素，绝大多数元素的原子质量大致都是氢原子质量的整数倍。比如说，假设氢原子的质量是1，那么一些相关元素的原子质量大致如下：碳，12.0；氮，14.0；氧，16.0；铝，27.0；磷，31.0；硫，32.1。

考虑到撞击的力量极大，出现这样的结果并不意外； α 粒子自身并未破碎，那么氮原子的分裂似乎在所难免。这个实验的结果表明，如果我们能用携带更高能量的 α 粒子——或者其他类似的入射粒子——轰击其他较轻元素的原子，或许它们的原子结构也会遭到破坏。

核反应

-

移居剑桥以后，卢瑟福请求帕特里克·布莱克特利用云室来研究 α 粒子与氮原子的反应。1924年，布莱克特拍摄了23000张照片，这些照片中一共有415000条离子化粒子留下的轨迹，其中8条轨迹表明， α 粒子与氮原子的碰撞产生了一个不稳定的氟原子，它很快又衰变成了一个氧原子和一个质子（ $N+He \rightarrow [F] \rightarrow O+H$ ）。

1920年，卢瑟福确定了氢原子核的确是所有原子核的基本组成单元，这是一种新的基本粒子，卢瑟福将它命名为“质子”。

第二年，卢瑟福在与尼尔斯·玻尔的合作中提出，大部分原子的原子核里应该还存在一种电中性的粒子，它会稀释带正电荷的质子，避免质子相互排斥。卢瑟福提出，这种粒子也许应该叫“中子”。



1919

研究人员：

亚瑟·爱丁顿

弗兰克·沃森·戴森

查尔斯·戴维森

研究领域：

天体物理

结论：

爱因斯坦是正确的

爱因斯坦的理论能被证实吗？

广义相对论的实验验证

1882年，亚瑟·爱丁顿出生在英国肯德尔，31岁时，他成了剑桥大学的天文学教授。爱丁顿相信直觉，他经常浮想联翩，提出一些关于恒星结构和恒星能量来源的理论——然后再去为自己的直觉寻找证据。幸运的是，很多时候他总是对的。

听说了爱因斯坦的广义相对论以后，爱丁顿激动万分。当时英国和德国正在交战，爱国的英国人对敌国的科学进展漠不关心，但爱丁顿是个和平主义者，所以他成了第一个用英语宣讲相对论的学者。

接下来，爱丁顿和皇家天文学家弗兰克·沃森·戴森一起说服了政府资助两支探险队去观察1919年5月29日的日全食，他们认为，这次的观测数据也许能够支持爱因斯坦的理论。



预言

-

根据广义相对论，引力会扭曲光线。如果来自遥远恒星的光从太阳附近经过，那么强大的引力场会导致光线向太阳的方向发生弯曲，于是在地球上观察的我们就会发现，这颗恒星在天空中的位置有细微的偏差。

大部分时间我们根本不可能观察到这类现象，因为阳光太过耀眼，我们根本看不见与太阳擦肩而过的遥远星光。不过，在日全食期间，太阳的光芒会被月球遮掩，所以在那几分钟里，我们可以看到这些远方的星星。我们可以拍摄日全食期间的照片，然后与日全食结束后的照片互相比对，检查确认遥远恒星的位置。

引力对光线的影响应该非常细微。如果爱因斯坦的理论正确，那么星光会偏转一个很小的角度。一个圆是360度，每度又分为60分，每

分有60秒。恒星出现在我们视野中的位置应该比它的实际位置离太阳更远。根据牛顿的引力学说，星光应该偏转0.87秒（也就是说还不到1秒），但若是按照爱因斯坦的理论，星光会偏转1.75秒——是牛顿预测值的两倍还多一点。

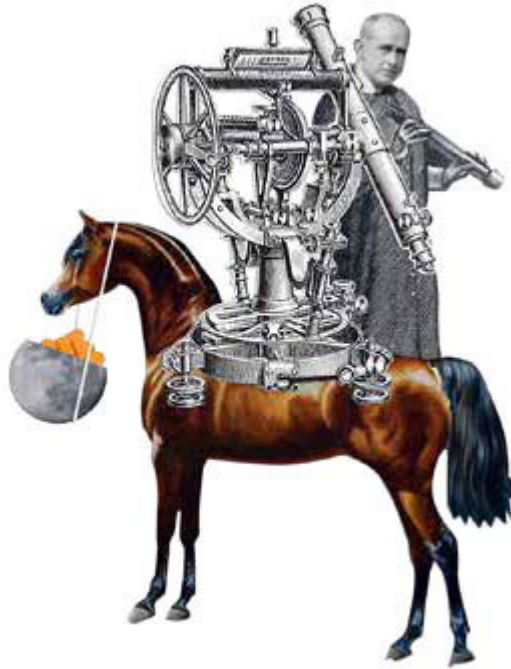
在世界上的哪个地方？

-

地球上能观察到这次日全食的区域从巴西开始，跨越大西洋和非洲中部，一直延伸到坦噶尼喀湖畔。研究者决定派出两支探险队，分别前往巴西的索布拉尔和中非西海岸外几内亚湾的葡属普林西比岛。

1919年3月8日，探险队带着当时最好的望远镜和特制的折叠式帐篷登上了“安瑟莫号”。前往巴西的小队于3月23日登上巴西海岸，随后转乘轮船和火车顺利抵达索布拉尔。

与此同时，前往普林西比的小队乘坐“安瑟莫号”经马德拉前往葡萄牙，4月23日，他们到达了目的地。队员们在面朝西边的小隔间里架起了设备，望远镜的镜头直指大洋上空。



日全食当天

-

那天清晨，巴西的天空中阴云密布。“第一次接触”（月亮开始遮掩太阳表面）刚开始的时候，云层依然很厚，不过探险队队员依然借助稀薄的阳光成功校准了望远镜的方向。随后云层渐渐散去，就在月亮完全遮盖太阳之前的一分钟，太阳周围空出了一片清晰的区域。太阳刚刚消失，队员们立即打开了节拍器，其中一个节拍器每隔10拍就会发出一次响声，观测员借助这种方法来测量曝光时间。最终，探险队队员利用两部相机拍下了总共27张底片。



普林西比小队就没这么幸运了。日全食那天早晨，当地出现了严重的雷暴，暴风雨一直持续到下午2:15。整个上午天空中乌云密布，直到下午1:15分，队员们才在云层的缝隙中瞥见了太阳的一角。最终他们竭尽全力拍下了16张底片，但其中只有7张有用。

结果和结论

-

介绍这次观测的论文长达45页，其中有许多页的表格和计算过程，最后他们得出结果，星光偏转的角度分别如下：

巴西 $1.98\text{秒}\pm 0.12\text{秒}$

普林西比 $1.61\text{秒}\pm 0.30\text{秒}$

这两个结果都更接近广义相对论提出的1.75秒，而不是牛顿力学的0.87秒。

爱因斯坦的理论得到了有力的证明。

1922

研究人员：

奥托·施特恩

瓦尔特·格拉赫

研究领域：

原子物理学和量子力学

结论：

电子自旋存在两种状态

粒子会旋转吗？

施特恩-格拉赫实验

1920年左右，科学界对新兴的量子力学和原子结构尚有一些争议。在卢瑟福提出的经典模型中，带负电的电子围绕带正电的原子核高速运动。早在法拉第的年代，人们就已经知道，这样运动的电子应该表现出微型磁铁的特性。

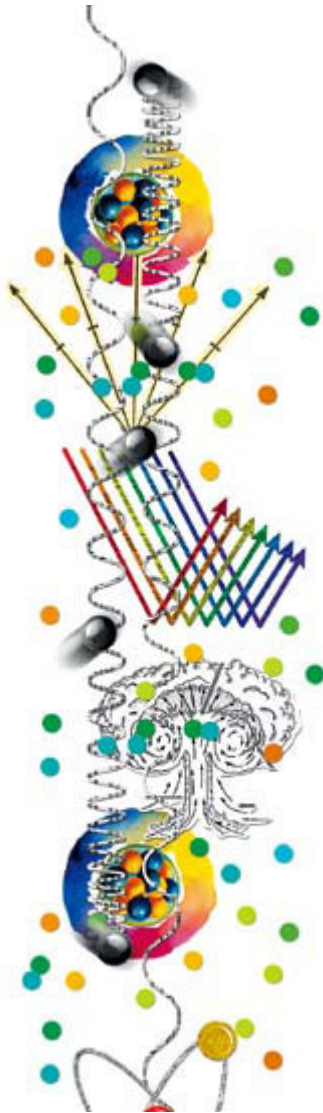
既然如此，如果让一束原子穿过一个磁场，那么原子束应该发生偏转，因为这些“微型磁铁”会被磁场吸引或排斥；那么，如果磁场是不均匀的，北极的磁力大于南极（或者反之），而原子可能向任何方向运动，所以它们在各个方向上发生的偏转应该差不多。因此，根据经典的原子结构理论，原子束应该向四面八方发散，如果这些原子撞击到屏幕上，应该形成一片黑斑。

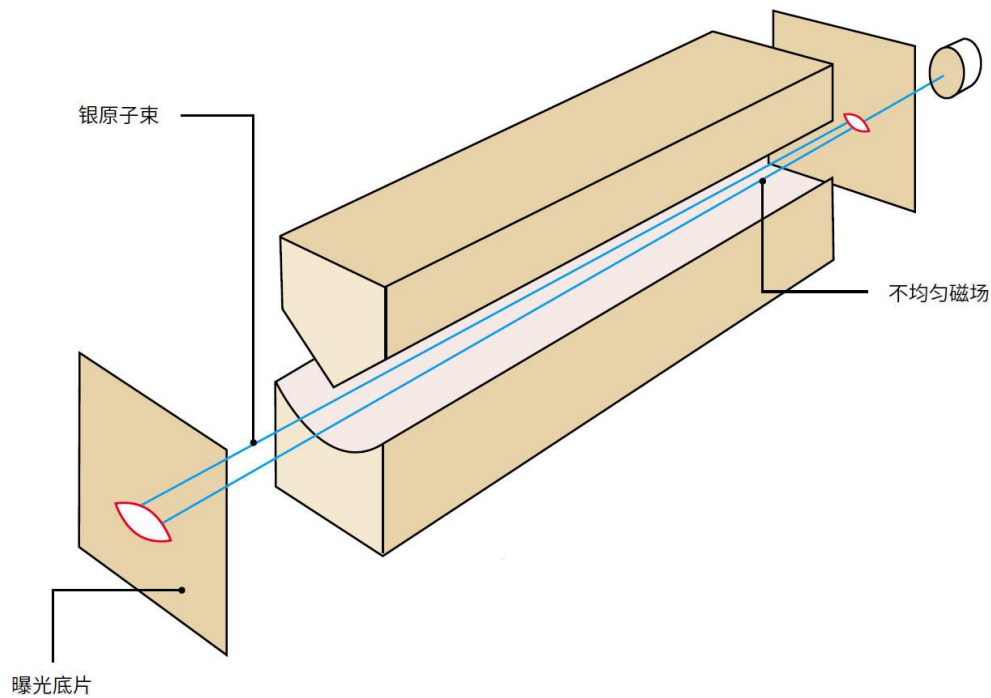
粒子自旋值

-

量子力学的先驱尼尔斯·玻尔提出，这类粒子的磁矩（或者说“自旋”）只可能有两个值： $+1/2$ 或 $-1/2$ 。原子本身的方向不会影响计算结果，这就是自旋的量子特性。如果玻尔的理论正确，那么射入磁场的原子束应该会分成两股，在屏幕上留下两个斑点。出生在如今波兰境内的德国犹太物理家奥托·施特恩曾经与爱因斯坦并肩工作，1915年，他去了德国的法兰克福。瓦尔特·格拉赫也是一位德国科学家，第一次世界大战期间，格拉赫曾在德国军队中服役；1921年，他在法兰克福

担任教授。就在那一年年底，施特恩和格拉赫共同设计了一个著名的实验。施特恩说：“如果这个实验能够成功实施，那么量子理论与经典模型之争就能得出一个清晰的结果。”但施特恩很快就离开法兰克福，去了罗斯托克担任教授；1933年，他移民到了美国。





测试含核原子的自旋

一次胜利

-

1922年初，格拉赫在法兰克福大学开始了自己的实验，他将一束银原子射入不均匀的磁场。根据玻尔和索末菲的最新理论，银原子的原子核应该会自旋。

穿过均匀磁场的银原子在屏幕上留下了一条很宽的条带，但是当格拉赫调节磁场，让它变得不再均匀以后，宽条带从中间一分为二，变成了两条，看起来就像唇印一样。

这样看来，量子理论和玻尔-索末菲模型似乎获得了胜利。

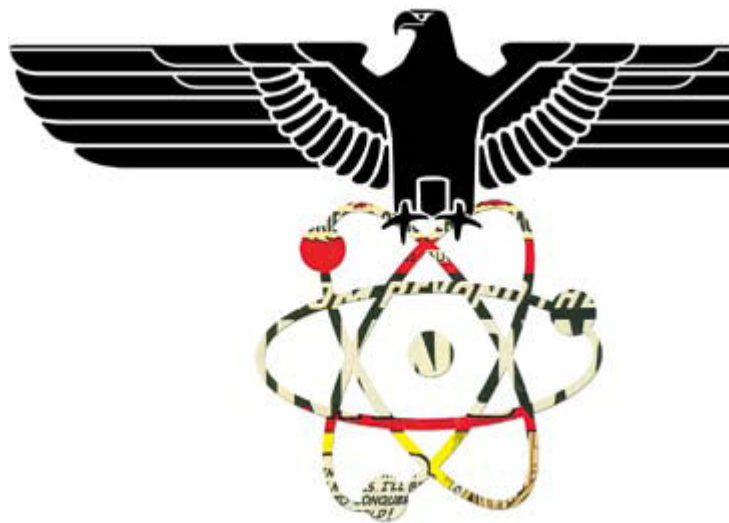
但是.....

不幸的是，玻尔和索末菲是错的。银原子核并不会自旋，但当时谁也不知道这一点，直到三年以后，乌伦贝克和高斯密特才提出，自旋的其实是电子。银原子含有23对电子，最外层还有一个孤立电子，正是这个孤立电子的自旋导致了原子束在不均匀磁场中发生偏转。

（所有原子量为奇数的元素拥有的电子数量都是奇数——其中包括氢、锂、硼、氮、氟、钠和银。）

所以，施特恩-格拉赫实验得出了正确的结果，虽然是出于错误的原因。不过，实验本身非常成功，因为它为量子力学的量子化理论提供了最早、最直接的证据，也证明了自旋值的确只有两个。

后来，其他类似的实验表明，某些原子的原子核的确会自旋。20世纪30年代，伊西多·拉比证明了我们可以通过人工的方式扭转自旋的方向，这奠定了医用磁共振成像设备的理论基础。20世纪60年代，诺曼·F.拉姆齐改进了拉比的设备，制造出了原子钟。



虽然格拉赫独力实施了这个实验，但获得诺贝尔奖的却只有施特恩，显然，格拉赫之所以与这份荣誉失之交臂，是因为后来他曾为纳粹领导下的德国效力。不过，无论如何，施特恩-格拉赫实验都是量子物理学领域最重要的实验之一。

1923—1927

研究人员：

克林顿·戴维森

雷斯特·革末

研究领域：

量子力学

结论：

电子既是粒子又是波

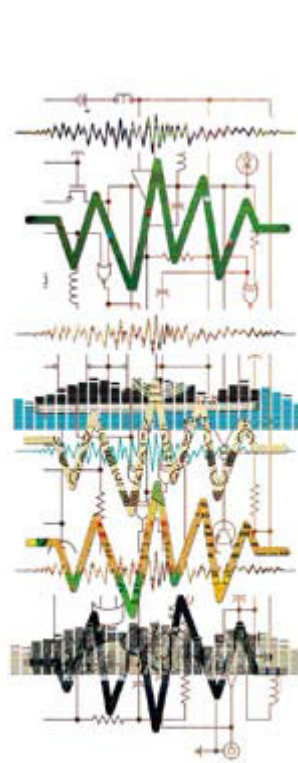
粒子会波动吗？

证明波粒二相性

某件事物当然要么是粒子，要么是波——或者也能二者皆是？1924年，法国物理学家路易·德布罗意——他实际上是第七代布罗意公爵，全名叫路易·维克多·皮埃尔·雷蒙德——在自己的博士论文中提出，电子具有波的特性。他甚至提出了一个十分新颖的观点：所有物质都具有波的特性。德布罗意的观点简直是对经典物理的亵渎，然而量子力学正在突飞猛进地发展，也许他的看法真有可取之处。最重要的是，德布罗意推导出了粒子的能量与波长的关系公式。

爱因斯坦在1905年发表的光电效应论文里指出，光具有波粒二相性，所以今天我们称之为“光量子”。那么，其他事物也具有类似的性质吗？哥廷根的瓦尔特·爱尔沙色提出，我们或许可以通过晶体的散射来研究这类物质作为波的特性。

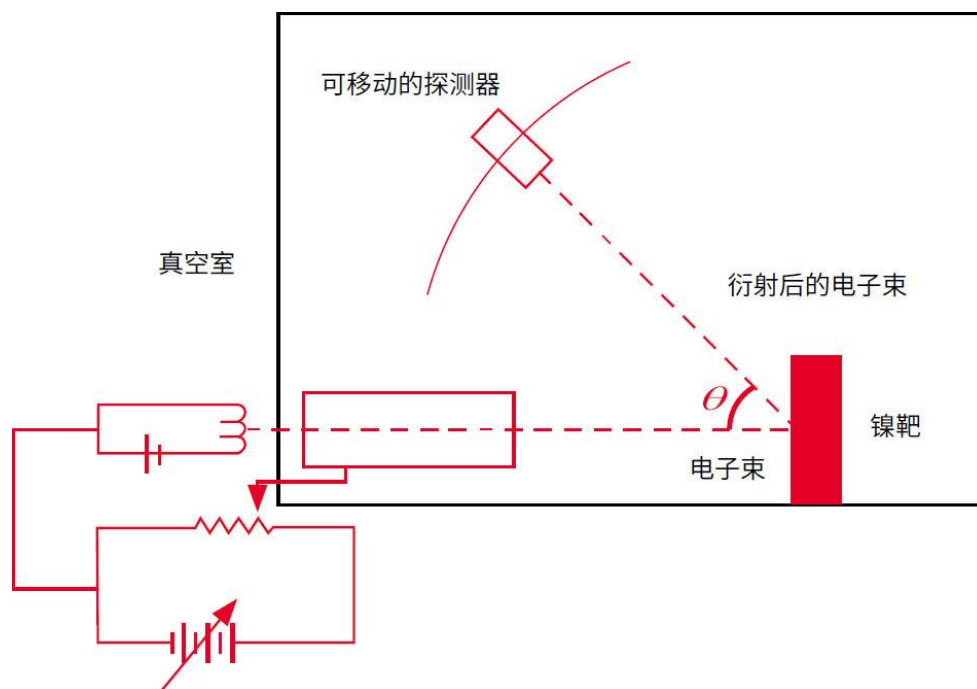
1923年，阿瑟·康普顿用一束X射线照射石墨，结果发现，X射线（和其他电磁辐射）似乎具有一定的重量，所以它们的确表现出了一些粒子的特性。



实验

-

1927年，克林顿·戴维森和雷斯特·革末在新泽西的贝尔实验室研究金属镍的表面结构，他们打算用一束电子来轰击镍，然后观察会发生什么现象。两位科学家加热灯丝制造出了电子束，然后利用中等大小的电压来加速电子束，电子束的能量可以通过电压进行调整。在50V的电压下，电子的能量是50电子伏（eV）。



电子的散射

然后，他们引导电子束从特定的角度轰击金属镍表面，并利用可移动的探测器测量电子的反射角度。两位科学家本来以为，粗糙的金属表面会让电子发生方向随机的散射，实验结果也的确如此：“电子……轰击金属表面后立即向着四面八方飞溅，速度也各不相同。”可是有一天，实验出了点小岔子，于是他们发现了一些出乎预料的事情。

令人欣喜的意外

-

为了避免电子与空气分子发生碰撞，整套实验装置都装在一个真空盒里，但不幸的是，这个盒子有点漏气，所以金属镍外面生成了一层氧化镍。戴维森和革末试图加热镍来清除外面的氧化层，但他们当时并没有意识到，高温会改变金属镍的结构。在加热之前，镍靶的表

面是一层微小的晶体，可是现在，小晶体聚合成了更大的结晶，每个晶体的宽度都大于电子束的直径。结果，在他们下一次做实验的时候，电子束击中的靶标变成了单个的晶体。

这一次他们发现，尽管一部分电子依然发生了随机的散射，但是在特定的电压下，很多电子却射向了同一个角度。比如说，加速电压为54V的时候，他们发现反射的电子束在50度的方向出现了一个峰值，感觉就像在角度合适的时候，你会看见高层建筑的窗户或者远处汽车的挡风玻璃反射出一束耀眼的阳光。

1915年，威廉·亨利·布拉格和他的儿子威廉·劳伦斯·布拉格因为“用X射线对晶体结构的研究”荣获诺贝尔物理学奖。他们的实验证明，晶体会让X射线发生特定角度的反射，因为晶体由一层层的原子组成，角度合适的时候，这些原子层就会像镜子一样反射X射线。不久后，人们开始利用X射线的衍射来研究晶体结构，测量射线的反射角度，就能算出晶体内部原子层之间的距离。

粒子和波

-

戴维森和革末报告称，在特定电压下，镍晶体会朝几个特定的方向精准地反射电子束，反射后的每组电子会分为3束或6束。他们一共发现了20组这样的角度，电子的反射路径和X射线一模一样。

换句话说，他们发现电子在这个实验中的表现与X射线完全相同，这意味着电子具有波的特性。

在戴维森、革末实验之前，人们一直以为电子只是带负电的粒子，不过现在，它又成了一种波。从某个角度来说，他们的发现与康普顿效应互为映射：康普顿发现了光波具有质量，而戴维森和革末发现电子拥有波长。波和粒子都表现出了属于对方的一些特性。

1927

研究人员：

维尔纳·卡尔·海森堡

研究领域：

量子力学

结论：

微观世界里的一切都是不确定的

一切都是不确定的？

海森堡不确定性原理

如果我们知道某个粒子的运动速度，那么就没法知道它的确切位置。德国物理学家维尔纳·海森堡是量子力学的主要先驱之一。1901年，海森堡出生在德国的维尔茨堡，后来他曾在慕尼黑和哥廷根学习物理和数学。1924年底，海森堡去了哥本哈根协助尼尔斯·玻尔工作；1927年，他在哥本哈根构建量子力学的数学基础时提出了著名的不确定性原理。

一个思维实验

-

量子理论的早期模型提出，电子在固定的轨道上绕原子核运动。海森堡不喜欢这个模型，他说，我们无法真正观察到电子的轨道，所以根本无法确认电子的确存在于这些轨道上。我们能观察到的只是电子在不同的轨道上跃迁时释放或吸收的光。



于是海森堡做了一个思维实验。显微镜靠光波把图像投射到观察者的眼睛里。来自太阳或电灯的光照亮了物镜下的样本，部分光线反射进入物镜，通过显微镜内部的镜片组传入观察者的眼睛。海森堡希望直接观察电子，但光却无法照亮这些小家伙，因为可见光的波长太长。这就像用渔网捕捞尘埃，结果必然是一场空。

为了获得更高的分辨率，海森堡构思了新的显微镜，他希望用 γ 射线来取代光波，充当传递图像的介质。 γ 射线的性质和光波相似，但它的波长要短得多，这意味着显微镜可以达到极高的分辨率。通过这种方法，我们或许能够直接观察电子，找到它们的确切位置。

问题

但是， γ 射线携带的能量比可见光大得多——所以当它照射到电子上的时候，必然会对电子施加一个作用力，使电子飞向某个未知的方向。如果海森堡想精确地测量电子的位置，他就必须使用能量更高的 γ 射线，于是电子受到的力也会变大。

换句话说，对电子位置的测量越精确，那么电子的运动速度和方向受到的干扰就越大。反过来说，对电子运动轨迹的测量越精确，那么它的位置就越不精确。

虽然这个想法来自测量电子位置的思维实验，但海森堡知道，这种不确定性与测量方法无关，它是量子世界的内在属性。



1927年2月23日，海森堡给自己的朋友沃尔夫冈·泡利写了一封信，解释了自己的想法。也就是在那一年，他用数学方法证明了这种不确定性，并发表了一篇完整的论文。这套理论被称为“海森堡不确定性原理”，后来它成了量子力学哥本哈根诠释的基础理论之一。

再也不一样了

-

不确定性原理听起来似乎无足轻重，但哪怕是从最保守的角度来说，它也改变了整个物理学的面貌。在此之前，从理论上说，如果知道某个粒子在某个时刻的确切位置和运动轨迹，那么你就能预测它在未来任意时间的位置。在艾萨克·牛顿构建的宇宙里，一切都是确定的。

但海森堡不确定性原理改变了这一切，他证明了我们不可能同时知道粒子的位置和轨迹。

幸运的是，这套理论只适用于量子力学的领域。我们的“真实”世界也同样存在不确定性，但它的影响很小，无法测量，也不必在意。牛顿力学将人类送上了地球，在这个令人安心的理论框架下，你还能继续开车，而要是运气和技术都够好，你也能接住迎面飞来的棒球。

1927—1929

研究人员：

亚历山大·弗里德曼

乔治·亨利·约瑟夫·爱德华·勒梅特

爱德文·哈勃

研究领域：

宇宙学

结论：

宇宙从大爆炸开始，随后以越来越快的速度膨胀

宇宙为什么会膨胀？

宇宙蛋

1922年，俄罗斯彼尔姆国立大学教授亚历山大·弗里德曼在德国发表了一篇复杂的论文，他在文中提出，宇宙可能在不断膨胀。

比利时的天主教神父亨利·勒梅特也独立得出了类似的结论，1927年，勒梅特发表了一篇题为《质量固定的匀质宇宙半径增大导致河外星云径向运动》的论文，在这篇文章中，他提出了所谓的“哈勃定律”，并估算了哈勃常数。

爱因斯坦的怀疑

-

爱因斯坦对勒梅特的数学计算很感兴趣，但他并不相信宇宙正在膨胀。勒梅特回忆，当时爱因斯坦表示：“Vos calculs sont corrects, mais votre physique est abominable.”（“你的计算是对的，但物理方面却错得离谱。”）

1931年，勒梅特在《自然》杂志上发表了一篇论文：

“我不禁想到，根据目前的量子理论，宇宙之初的自然规律可能与现在大不相同。从量子理论的角度来看，热力学定律可以用下面的方式表达：（1）恒定总量的能量以离散量子的形式分布。（2）离散量子的数量总在不断增长。如果沿着时间的维度向前回

溯，我们一定会发现量子的数量越来越少；直到最后，宇宙中的所有能量可能全部包含在几个甚至一个量子里。”



勒梅特提出，宇宙是从一个点开始膨胀的，然后他谈到了“创世时刻的宇宙蛋爆炸”。后来在一档广播节目中，不相信宇宙膨胀的英国天体物理学家弗雷德·霍伊尔不屑一顾地将勒梅特的观点称为“大爆炸理论”，于是这个名字流传到了今天。

爱因斯坦逐渐开始认同勒梅特的理论。在加利福尼亚听了勒梅特的一场演讲以后，爱因斯坦说：“这是我所听过的关于宇宙起源最美、最完善的解释。”

进入美国

-

年轻的爱德文·哈勃在伊利诺伊和肯塔基长大，为了满足父亲的愿望，他选择了法律作为自己的专业；作为首批罗德学者，他还曾前往牛津大学进修。但哈勃真正热爱的是天文学，父亲去世以后，他终于回归了自己深爱的领域。

第一次世界大战结束后，哈勃在英国剑桥待了一年，然后他在加州帕萨迪纳的威尔逊山天文台找了一份工作。接下来，他的一生都将在这里度过。

哈勃研究的是一种名叫造父变星的特殊星体，它存在于多个星云之中，其中包括仙女座星云。造父变星的光芒会出现有规律的明暗变化，变化节律可能持续数天。这种星体特别有趣，因为它们的亮度和脉动周期有极强的相关性。也就是说，根据造父变星的明暗变化，天文学家可以算出它的绝对亮度。所以，这类星星成了宇宙中的“标准烛光”。

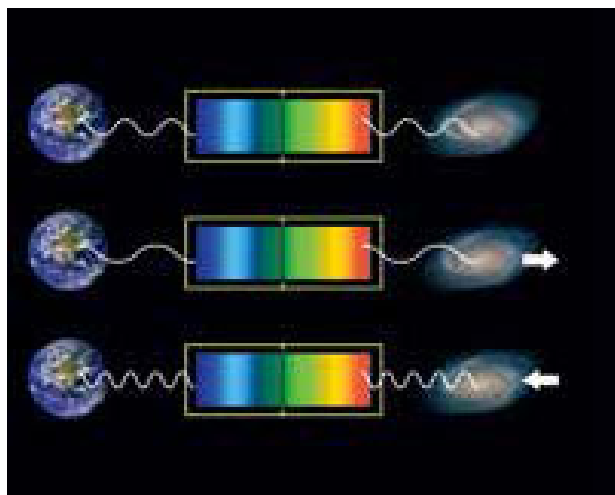
知道了标准烛光的绝对亮度，再加上我们观察到的实际亮度，天文学家就能算出这个星体离我们到底有多远。

星云由尘埃或气体组成。20世纪20年代初，人们认为所有星云都是银河系内的尘埃气体云，而银河系就是整个宇宙。但哈勃的观测结果表明，有的星系与我们之间的距离比银河系里最远的恒星还要远得多——因此，这些星云实际上属于其他遥远的星系。哈勃的发现让人们突然看到，宇宙比我们想象的还要大数百万倍。

红移

-

1929年，哈勃观察到了46个遥远星系的红移。当时的人们已经知道，如果一个星系（或者一颗星星）正在朝远离我们的方向运动，那么它释放的光会发生“红移”——也就向光谱的红色（长波）端移动。



红移

现在我们知道，星系红移是因为空间本身在不断拉伸，它造成的结果类似多普勒效应。红移越明显，星系远离我们的速度就越快。

哈勃发现，星系红移的速度大致与它离我们的距离成正比。换句话说，离我们越远的星系后退得越快。

1932

研究人员：

卡尔·戴维·安德森

研究领域：

粒子物理

结论：

除了普通的物质以外，还存在反物质

反物质真的存在吗？

寻找正电子和负质子

有些人认为，英国理论物理学家保罗·狄拉克是艾萨克·牛顿之后最伟大的理论物理学家，他综合量子力学与狭义相对论，发展出了一套奇怪的数学架构。狄拉克描述了近光速电子的行为——然后从中发现了一些奇怪的事情。狄拉克在1928年推导的方程是为了描述带负电的电子，但它同样适用于带正电的“电子”。

狄拉克提出，不光是电子拥有带正电的对应粒子，其他所有粒子都拥有自己的“反粒子”。正如质子和电子组成了原子，反质子和反电子也会组成反原子。换句话说，他预测了反物质的存在，虽然在此之前，人类从未观察到这类事物。

狄拉克甚至认为，宇宙中可能存在一个完全由反物质构成的太阳系：

“自然界中的正电荷和负电荷是完全对称的，如果接受了这一基本观点，那么我们会发现，地球（甚至整个太阳系）主要由带负电的电子和带正电的质子组成，这只不过是出于偶然。宇宙中的某些恒星很可能与我们的地球完全相反，它们主要由带正电的电子和带负电的质子组成。事实上，也许每种类型的星星都有一半是由反物质构成的。正物质和反物质组成的星星表现出的光谱完全相同，所以现有的天文学手段根本无法区分它们。”



因此，狄拉克提出，宇宙中可能存在反物质组成的恒星和行星。

奥地利，1911年—1913年

-

15年前，奥地利物理学家维克多·赫斯对大气中的电离辐射产生了兴趣。当时的人们认为，这些辐射来自地球上的放射性岩石。但是根据赫斯的计算，如果事实真的如此，那么在离地面大约1640英尺（约500米）的高空中，这些辐射就应该消失。于是他决定验证一下。

赫斯乘坐气球完成了10次高空探测，冒着莫大的风险，他发现在离地面0.6英里（约0.97千米）的高度，电离辐射的确有所下降，但很快又再次上升；在离地面3.5英里（约5.6千米）的高空中，电离辐射的强度是海平面上的2倍。于是赫斯总结说：“有一种穿透能量极强的射线从上面进入了我们的大气。”

1912年4月，赫斯甚至在日食期间冒险升空，结果发现，神秘的辐射并没有随着太阳的消失而减弱，所以它的来源并不是太阳。这种神秘的辐射被称为“赫斯射线”，后来它又有了另一个更常用的名字：“宇宙射线”——因为它来自外太空。无论日夜，整个地球都一直沐浴在电磁波粒的洪流之中。

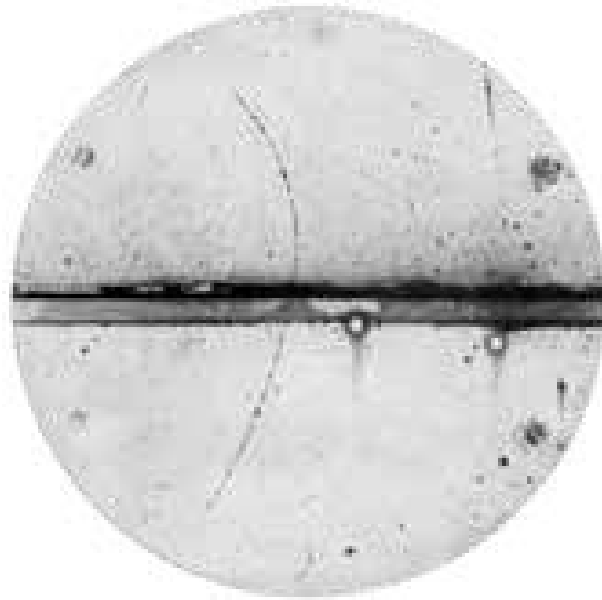
加州理工学院，1932年

-

卡尔·安德森在加州理工学院学习物理学和工程学。1932年，他开始利用改进后的云室研究宇宙射线。他使用的云室后来被人们称为“安德森云室”。

1932年8月2日，安德森利用垂直的威尔逊云室拍摄宇宙射线轨迹时发现了一条古怪的痕迹，它只可能来自某种质量与自由负电子相当的带正电荷的粒子。

下图就是安德森在云室中拍摄的那张重要照片，照片中央是一道0.24英寸（约6毫米）厚的铅板。宇宙射线从照片下方进入云室，随后在强磁场的作用下向左偏转，这证明它携带正电荷；如果这道射线携带的是负电荷，那它就应该向右偏转。然后，粒子穿过铅板进入云室上半部分，能量略有损失——所以它偏转得更厉害了。穿透铅板之后，这个粒子又穿过了2英寸（约5厘米）厚的空气，这说明它的体积很小——质子绝不可能飞行这么远的距离。



安德森云室

长5.5英寸（约14厘米）

深0.4英寸（约1厘米）

这个研究任务并不轻松。安德森拍摄并检查了1300张照片，结果只发现了15道类似的正电宇宙射线轨迹。

“因此可以得出结论，正电子的质量很可能与自由负电子完全相等。”

反物质

-

如果反粒子与自己的对应正粒子发生碰撞——例如电子与正电子碰撞——它们会彼此湮灭，释放出 γ 射线。显然，宇宙中并不存在由反物质组成的大片区域，因为我们并未观察到正反物质湮灭释放的巨量 γ 射线。大爆炸产生的正物质为何远远多于反物质？这是宇宙学中最大的谜团之一。

1933

研究人员：

弗里茨·兹威基

研究领域：

宇宙学

结论：

我们能够看见的星星只占宇宙质量的极小一部分

引力如何构建银河系？

暗物质与看不见的宇宙

弗里茨·兹威基是有史以来最伟大的天体物理学家之一。这位性情乖僻的天才提出，宇宙中存在大量看不见的物质。那么他是怎么发现这一点的呢？

1898年，兹威基出生在保加利亚，他的父亲是个瑞士人，母亲则来自捷克。6岁时，兹威基被送到瑞士的祖父母家里学习商务，但他很快放弃了这条道路，转而开始学习数学和物理。1925年，兹威基移民到了美国，他来到加州理工学院，和罗伯特·密立根一起工作。在这里，他对天文学、天体物理学和宇宙学产生了兴趣，也在这个领域做出了极大的贡献。

超新星和中子星

-

20世纪30年代初，兹威基开始和德国天文学家沃尔特·巴德一起研究“新恒星”。兹威基认为，宇宙射线来自恒星的剧烈爆炸，他称之为“超新星爆发”。接下来的52年里，兹威基和巴德发现了120颗超新星。超新星爆发的现象不算新鲜——早在1572年，第谷·布拉赫就曾观测到超新星爆发——但在此之前，还没有任何人对此做出合理的解释。

1933年，兹威基提出，一般而言，大质量恒星在生命终结时会发生剧烈的爆炸，由此产生大量可见光和宇宙射线。恒星爆炸后的残骸密度极大，所有的质子和电子会挤在一起，转化成中子，最终形成的中子星体积很小，直径可能只有几英里，但密度大得超乎想象。当时距离中子的发现才刚刚过去了一年，谁也不相信兹威基的理论，直到1957年，约瑟琳·伯奈尔发现了脉冲星。

兹威基拥有卓越的头脑，他尤其擅长横向思考。在他去世以后，天文学家史蒂芬·莫勒写道：“只要谈到中子星、暗物质、引力透镜之类的话题，所有研究者的开场白总是千篇一律：‘早在20世纪30年代，兹威基就注意到了这些问题，但当时谁也不相信他的话……’”

星系的质量到底有多大？

-

1932年，荷兰天文学家扬·奥尔特提出，根据恒星的运动轨迹推算，银河系中存在的物质肯定比我们能够观察到的要多得多。但是后来人们发现，他的测量结果是错的。

1933年，兹威基首次运用维里定理计算了3.2亿光年外的后发座星系团的质量。维里定理描述了星系的轨道速度和它受到的引力之间的关系，“维里（virial）”这个词来自拉丁语里的“vis”，意思是“力”。1870年，德国物理学家鲁道夫·克劳修斯首次提出了这个定理。

兹威基观察了星系团边缘的星系运动，并利用这些数据来估算整个星系团的总质量。然后，他又根据这些星系的亮度算出了另一个总质量数据。

结果，兹威基发现，前者的计算结果大约是后者的400倍。我们能够观察到的物质质量完全不足以支持星系做如此高速的轨道运动，这中间似乎缺了点儿东西。根据这个“看不见的质量问题”，兹威基推断，星系团中一定存在大量看不见的物质，他称之为“Dunkle Materie”，即“暗物质”。



神秘物质

-

实际上，兹威基的估算误差很大，但“看不见的质量问题”的确存在，现在，天文学家已经找到了足够的证据来支持他的观点。在大部分星系中，恒星的轨道速度都远大于可见的物质质量能够支持的程度，这样看来，大部分星系内都存在一个大体均匀的暗物质球，可见的恒星位于中央的碟状区域中。



科学家对引力透镜（这种效应也是兹威基在1937年首次提出的）的观测证实了星系中的确存在额外的质量：不管可见还是不可见，一大团密集的物质扭曲了时空，远处的天体看起来就像隔了一个透镜，出现了变形和扭曲。有时候我们会发现，可见物质的质量根本不可能形成这么强的引力透镜。

20世纪60年代末和70年代初，薇拉·鲁宾测量了螺旋星系内恒星的轨道速度，结果发现，大部分恒星绕轨运行的速度相同，但远离星系中心的恒星绕轨速度却要慢得多。这意味着星系中央的质量密度大致保持均匀，但是，这个“均匀质量”的范围却远远超过了中央密集恒星团的界线，大部分星系的质量至少要达到其内部可见恒星总质量的6倍以上，才能解释天文学家观察到的现象。

而在我们的银河系里，暗物质的数量大概是可见物质的10倍左右。2005年，来自威尔士卡迪夫大学的天文学家宣称他们发现了一个质量只有银河系十分之一的星系，它完全由暗物质组成。

现在，科学家普遍认为，暗物质构成了整个宇宙的27%，而宇宙的其余部分主要由暗能量构成。

1935

研究人员：

埃尔温·薛定谔

研究领域：

量子物理

结论：

两种可能性同时存在

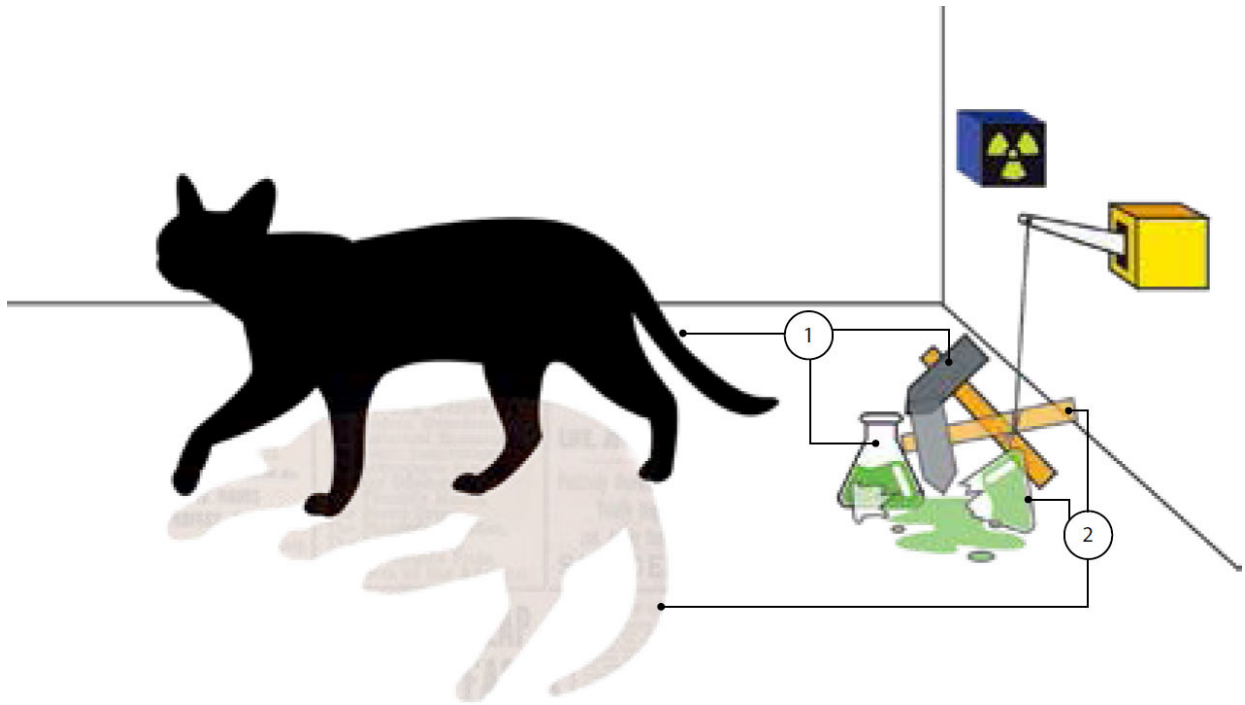
薛定谔的猫是死还是活？

量子力学悖论

一只猫如何能够同时既死又活？1935年，奥地利物理学家埃尔温·薛定谔提出了这个颇富哲学意味的问题。在此之前的15年里，诸多理论物理学家和数学家一直在完善量子力学的框架细节，哥本哈根的尼尔斯·玻尔和维尔纳·海森堡是这幢大厦的首席建筑师，他们建立的理论后来被称为量子力学的哥本哈根诠释。但薛定谔认为，哥本哈根诠释应用于宏观物体时会出现一个问题。

玻尔和海森堡曾提出过一套“量子态叠加”理论。如果某个粒子（或者某个光量子）拥有两种可能的状态或位置，但我们无法确认它到底处于哪种状态（或位置），那么按照量子态叠加理论，在被观测到之前，它同时拥有两种状态（或位置）。一旦被观测，它会立即坍缩成一个态。所以，只有观察者才能将粒子固定在某个可能的状态下。

薛定谔不喜欢量子态叠加的主意，所以他通过思维实验提出了一个悖论。



并没有猫受到伤害.....

-

假如有一只猫被关在一个铁盒子里，无法逃脱。除了这只猫以外，盒子里还有少许放射性物质、一台盖革计数器和一瓶致命的氰化物毒素。如果放射性物质的某个原子发生了衰变，那么盖革计数器会探测到它的衰变并激活开关，推动一把锤子敲碎瓶子释放毒素，导致猫死亡。

放射性原子的衰变完全无法预测。盒子中的放射性物质可能下一秒就会衰变，也可能一年都不会衰变。因此，既然谁也看不到盒子里的情况，那么半小时以后，谁也说不清里面的放射性元素到底有没有发生衰变。根据量子态叠加理论，这些原子同时处于衰变和未衰变的状态。

观察者的重要性

-

但是，这也意味着盒子里的猫既是死的，又是活的——除非有观察者打开盒子，确定最终的结果。薛定谔表示，这毫无道理，量子态叠加理论在真实世界里显得如此荒谬。他写道，这个悖论“使得我们无法接受用这种‘模糊的模型’来代表现实。虽然就这套理论本身而言，它没有任何不清楚或矛盾的地方”。

有人反驳说，那只猫也算是观察者，它应该知道原子是否发生了衰变——如果它还活着。

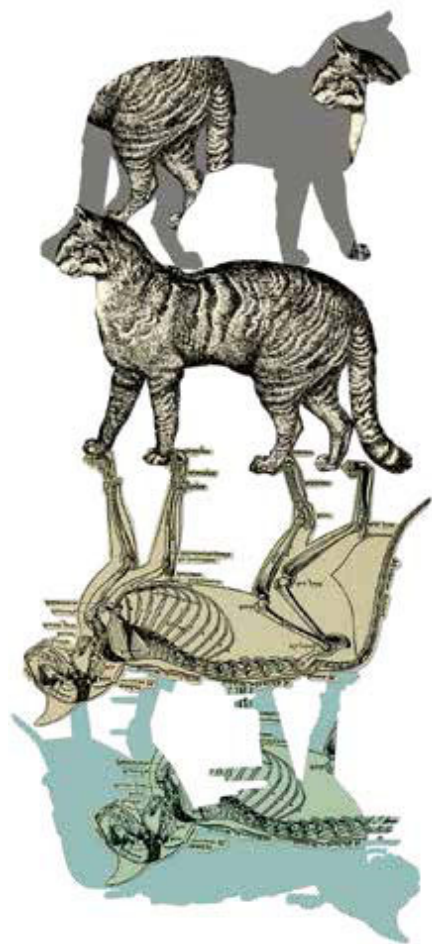
尼尔斯·玻尔本人却认为观察者的出现并无必要，他觉得在观察者打开盒子之前，猫的死活早已确定。他指出，猫的死活是由盖革计数器决定的，所以事实上，这个计数器充当了观察者的角色。这种解释是不是更合理呢？但阿尔伯特·爱因斯坦却并不认可。1950年，爱因斯坦给薛定谔写了一封信：

“如果一个人足够诚实，他就无法逃避对‘真实’的设想.....在当今的物理学家中，只有你做到了这一点。大部分人根本不明白自己正在对‘真实’玩弄多么危险的把戏——他们以为真实是纯然的理论假设，与实验得出的结果完全无关。但是，你用放射性原子+.....[原理].....+盒子里的猫.....以最优雅的方式驳斥了他们的诠释。谁也不会真正质疑这一点：猫的存在或不存在与观察行为全然无关。”

多世界

-

后来，量子力学模型引入了新的想法。1957年，休·艾弗雷特提出了“多世界诠释”，根据这套理论，两种可能性都是真的，确切地说，无论过去还是未来，所有可能性全都真实存在。艾弗雷特认为，存在很多很多个宇宙，每一种可能性都曾真实地发生过，只是它们各自存在于不同的宇宙中。按照多世界诠释，薛定谔的盒子打开的一刹那，观察者和猫就各自分裂成了两个。在其中一个宇宙里，观察者看到猫还活着，而在另一个宇宙里，它已经死了——但这两位观察者永远无法见面，也不能交流。



薛定谔的猫成了举世皆知的明星，关于它的争论从来就不曾停歇——它是量子力学领域里知名度最高的动物。

1939

研究人员：

利奥·西拉德

恩里科·费米

研究领域：

核物理

结论：

核反应会产生能量

怎样利用核物理知识造出原子弹？

第一座核反应堆

1933年，匈牙利物理学家利奥·西拉德在英国访问时在《泰晤士报》上读到了当时的原子物理大佬欧内斯特·卢瑟福发表演讲的消息。卢瑟福在演讲中否认了通过核反应获取能量的可能性：“……一切试图从原子转化中获取能量的努力都是空中楼阁。”

可怕的想法

-

西拉德很不赞同卢瑟福的说法。特别是在9月12日那个阴霾密布的清晨，西拉德漫步在伦敦布卢姆茨伯里街区，想到卢瑟福的演讲，他感到心烦不已。西拉德在大不列颠博物馆附近的南安普顿路街口停下来等红绿灯，就在绿灯亮起的那一刻，一个可怕的想法突然闯入了他的脑海：假如能用新发现的中子启动某个反应——让一个原子产生两个中子，那么这两个中子又将启动另外两个原子发生反应，从而释放出四个中子，一生二，二生四，四生八……最终形成链式反应。



正如理查德·罗兹在《原子弹秘史》中所说：“就在他穿越街道的那个瞬间，时间裂开了一条细缝，他看到通往未来的道路充满死亡与悲伤，世界将变得不复以往。”

意大利天才

-

恩里科·费米生于罗马，他是物理学界一颗冉冉升起的新星，在理论和实验两方面都颇有建树。1938年，费米获得了诺贝尔物理学奖，因为他用中子轰击重原子，制造出了新的元素。不幸的是，后来人们发现，费米制造出来的其实并不是什么“新元素”，而是反应产生的放射性碎片。费米有些羞愧，但他依然自信满满。

1939年，战火越烧越烈，为了躲避纳粹和法西斯政权，西拉德和费米都移民到了美国。两位科学家意识到，德国科学家可能正在制造原子弹，于是他们给罗斯福总统写了一封警告信，并邀请爱因斯坦共同署名。

临界质量

-

与此同时，其他科学家已经发现，铀原子衰变时会释放出2个或3个中子，而一个慢中子可以引发另一个铀原子衰变。既然如此，我们就能利用铀原子的这种特性制造真正的原子核链式反应。只要让铀元素达到临界质量（大约15千克的纯铀——它的体积只比棒球大一点点），衰变释放的中子就足以引发下一步的衰变——从而形成一发不可收的链式反应。

费米和西拉德开始建造世界上的第一座核反应堆。他们齐聚芝加哥大学，打算在郊外的红门森林建造反应堆，因为那里比较安全。但是因为一场罢工，这个计划流产了。最终，科学家在一座废弃的体育中心的地下壁球场里建造了“芝加哥1号堆”（CP1），虽然这里人迹罕至，但毕竟还是大城市的核心地区。



这样的实验非常危险。根据西拉德、费米和其他科学家的计算，核反应应该能够按照计划启动和停止，但要是有什么地方出了差错，整个芝加哥都将毁于一旦。但是，当时美国已经陷入了战争的泥潭，这样的冒险或许是值得的。

芝加哥1号堆

-

核反应堆由球状的铀和石墨块组成。费米发现，铀原子衰变释放的中子速度太快，无法引发链式反应。石蜡和水能将中子减速到近乎静止的状态，因为中子会与这些材料里的氢原子发生碰撞。石墨的减速效果更好，它可以恰当地减缓中子的速度，提高链式反应的效率。

科学家还需要想个办法来减缓乃至阻止已经开始的链式反应，所以他们用镉和铟制作了一套控制棒，随时准备插入堆芯。镉和铟会吸收中子，从而减缓甚至阻止核反应。

反应堆装配完成时，控制棒是插在堆芯里的。1942年12月2日下午3:25，科学家抽出控制棒，CP1达到临界状态，史上第一次可控核反应开始了。28分钟后，费米关掉了反应堆。

后来，人们拆掉了这座反应堆，把它搬到了红门森林，并将它改名为CP2；阿贡国家实验室最早就是在这里建立的。接下来费米前往洛斯阿拉莫斯，成了曼哈顿计划的领头人。1945年，他在阿拉莫戈多沙漠亲自测量了第一次原子弹试验产生的能量。

6. 跨越宇宙：1940—2009

在本书的前几章中，我们总是看到科学家孤军奋战，各自设计制作自己的实验设备。随着研究工作变得越来越困难，需要的费用也越来越高昂，科学家逐渐聚集到一起，开始建立大型实验室。大科学时代就此拉开帷幕。

我们不妨看看环磁机的发展——这种仪器外形类似甜甜圈，用于研究核聚变。早在“冷战”时期，苏联就已经秘密制造出了最早的环磁机；随后这项技术继续发展，直到英国的欧洲联合环状反应堆（JET）制造出了太阳系内温度最高的等离子体，但是没过多久，规模庞大的ITER项目又让JET相形见绌。

超广角寻找行星计划（Super WASP）很好地体现了科学家的奇思妙想和计算机强大的运算能力，不过要说人类的骄傲，那还得数大型强子对撞机（LHC），它是迄今为止人类建造的最大、最复杂的实验设备。

1854年，路易·巴斯德曾说：“在观察的领域里，机会总是垂青有准备的头脑。”1965年，我们幸运地发现了大爆炸留下的余韵；两年后，苏珊·约瑟琳·贝尔又发现了脉冲星，这也许同样是因为幸运——或许是幸运和坚忍各占一半。这些发现推动了物理学界对黑洞的探索。

1956

研究人员：

伊戈尔·叶夫根耶维奇·塔姆

安德烈·德米特里耶维奇·萨哈罗夫

研究领域：

核物理

结论：

核聚变也许会在未来实现

一颗恒星诞生了？

环磁机的发展

从20世纪50年代起，人类就开始使用核裂变反应堆发电，但迄今为止，核能仍是一种昂贵的能源，而且核裂变的原材料和反应后的废料都具有放射性，所以核能发电存在几个问题：反应堆可能出现故障甚至熔化，海啸引起的洪水可能破坏反应堆，核电厂还有遭受恐怖袭击的风险。此外，放射性废料的长期处置也是个难题。

核聚变或许可以帮助我们解决这些问题。

聚变和裂变

-

在裂变过程中，重原子（例如铀原子或钚原子）分裂产生较轻元素的原子、微粒和大量能量。

而聚变则是两个小原子（例如氢原子）聚合形成更大的原子（例如氦原子）。与裂变相比，核聚变有几个优势。首先，聚变系统不会过热熔化，因为无论何时，参与反应的物质总质量都不会超过1克，所以即便这些材料达到了极高的温度，它们产生的总热量也很小——完全不足以熔化金属和陶瓷隔墙。

其次，聚变废料的处理也比较简单，因为它们没有放射性，而且聚变反应产生的能量是裂变的一千倍左右。

太阳——和其他所有恒星——的能量都来自氢原子聚合成氦的聚变反应，所以，我们要做的就是地球上制造一颗恒星。不过，无论是从物理学还是从工程学的角度来说，人工聚变都很难实现。人们总说，聚变反应堆离我们只有30年——这话已经说了好几十年——但科学家仍在不断尝试。

先驱

-

最早尝试人工聚变实验的是苏联的科学家，但迄今为止，我们仍不知道他们的详细实验情况，因为当时正值“冷战”期间，什么事情都要保密。我们只知道，有位名叫列夫·阿齐莫维奇的物理学家曾为苏联的原子弹小组工作。从1951年到1973年阿齐莫维奇去世，他一直是苏联聚变能项目的负责人。

在他的领导下，苏联的科学家完成了世界上最早的人工核聚变反应。别人问阿齐莫维奇热核反应堆何时能投入实际应用，他回答说：“等到人类需要的时候，或许比那再早一点。”这位苏联科学家被称为“环磁机之父”。



环磁机是专为核聚变反应设计的容器。“tokamak”这个词实际上是由首字母缩写组成的，它的原始俄语意思是“配备磁力线圈的环形室”。想象一个充满了气的橡胶圈或者汽车轮胎，环磁机的反应室就是这个形状的。

伊戈尔·叶夫根耶维奇·塔姆和安德烈·德米特里耶维奇·萨哈罗夫设计了最早的环磁机，1956年，苏联人在莫斯科的库尔恰托夫研究所造出了这台装置；1968年，他们又在新西伯利亚首次成功完成了聚变反应，得到了大约1800万华氏度（约1000万摄氏度）的高温。在那之后的第二年，英国和美国的物理学家确认了苏联人的这次实验。

目前，全球共有30台环磁机分布在16个国家里。迄今为止最大的环磁机是英国卡拉姆的欧洲联合环状反应堆（JET），它的环形室大得能让成年人在里面轻松漫步。

1983年6月25日，JET首次成功生成等离子体；1997年，它制造出了16兆瓦的聚变能，虽然持续的时间还不到1秒，但JET消耗的能量比它产出的还多，所以它永远也不会变成商业性的发电厂。

等离子体

-

要让氢原子聚合形成氦原子，我们必须设法让氢原子达到极高的速度，这样它们才能携带巨大的能量发生碰撞。要加速氢离子，必须将它们加热到极高的温度——比如说，1.8亿华氏度（约1亿摄氏度）。

在这样的高温下，氢会从气体变成等离子体。这意味着氢分子（ H_2 ）会分裂成原子（ H ），然后电子会从原子中剥离出来，只剩下质子（氢离子， H^+ ）与自由电子一起做高速运动。这两种粒子都携带电荷，因此可以被“磁瓶”约束。



如果这些粒子与容器壁发生碰撞，它们就会失去很多能量，可能还会对容器造成严重的破坏，所以必须用强磁场对它们进行约束。磁

场来自环磁机内的环形线圈，这些线圈制造出螺旋状的强磁场，也就是我们所说的“磁瓶”，它能够约束氢原子，避免高能粒子与容器壁发生碰撞。

聚变反应产生的能量主要由反应室夹层中的冷却水来吸收，也可以由反应中生成的中子带走，或者通过直接能量转换过程，将高速运动的带电粒子直接转换成电流。人们可以利用这些能量将水转化为过热蒸汽，驱动涡轮发电，这就是核聚变电站的基本原理。

1965

研究人员：

阿诺·阿兰·彭齐亚斯

罗伯特·伍德罗·威尔逊

研究领域：

宇宙学

结论：

现在我们看到了宇宙年轻时的模样

大爆炸留下了余韵吗？

发现宇宙微波背景辐射

阿诺·彭齐亚斯在获得物理学博士学位以后，去了新泽西霍姆代尔的贝尔实验室，与得克萨斯的物理学家罗伯特·威尔逊成了同事。

当时他们使用一台50英尺（约15米）的喇叭形高灵敏度微波天线（接收器）研究星系间的无线电信号。

无线电噪声

-

打开天线以后，他们听到了一种无法解释的无线电噪声——那是一种低沉的嗡嗡声。他们知道，要想探测来自宇宙的微弱信号，必须设法消除这种噪声。

两位科学家排除了所有电视和广播信号的干扰，然后用液氮将天线冷却到了4K（-452°F或-269°C），试图消除温度可能带来的影响。但奇怪的噪声依然没有消失。

最开始他们觉得噪声一定来自纽约——汽车火花塞之类的东西也会干扰天线——于是他们将天线对准了曼哈顿，但噪声却没有增加丝毫。他们意识到，这奇怪的声音一定来自天上。

两位科学家怀疑辐射来自银河系，但河内噪声理应更大一些，更奇怪的是，永不停歇的嗡嗡声似乎来自四面八方，无论将天线指向天

空中的哪个位置，它都不会消失，也不会改变。



鸽粪

-

当然，他们想到了噪声的来源也许就在身边——甚至可能就在接收天线内部。于是他们检查了设备，结果发现了一种“白色的绝缘材料”——换句话说，他们找到了一些鸽粪。也许噪声正是这些东西造成的。两位科学家清除了鸽粪，又对鸽子窝进行了一次大扫荡。

但奇怪的嗡嗡声依然挥之不去。

与此同时，在37英里（约60千米）外的普林斯顿大学，罗伯特·迪克、吉姆·皮布尔斯和大卫·威尔金森刚刚开始寻找这类微波辐射，他们推测，它可能来自大爆炸。彭齐亚斯的一位朋友看到了皮布尔斯的论文初稿，直到这时候，彭齐亚斯和威尔逊才如梦初醒地意识到，自己的发现有多么重要。

看到论文的副本以后，彭齐亚斯给迪克打了个电话，邀请他和同事一起来贝尔实验室看看自己的数据。彭齐亚斯和威尔逊的观察结果

非常符合普林斯顿的预测——“他们抢在了我们前头。”迪克这样说。1965年，他们联名在《天文物理期刊》上发表了几篇论文。

大爆炸的余韵

-

普林斯顿小组的预测是对的，彭齐亚斯和威尔逊听到的噪声来自宇宙微波背景辐射（CMB），它是大爆炸留下的余韵。

大爆炸释放出超乎想象的海量能量，其中部分能量最终聚合形成物质。大爆炸之后的短短38万年里，宇宙变成了透明的，能量在宇宙中穿梭，看起来就像无数道连绵不绝的闪电，色温约为3000K。摄影师用“色温”来描述光的白度，773K（932°F或500°C）的光是火红的，2319K（2732°F或1500°C）色温的光是黄的，3000K（4940°F或2727°C）的光呈正白色，阳光的色温大约是5000K（8540°F或4727°C）。

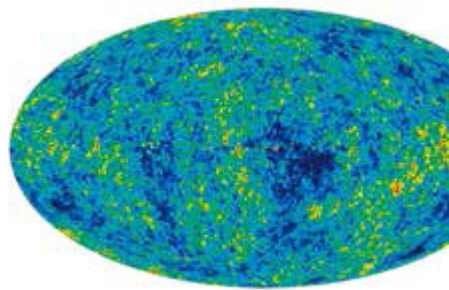
然后，宇宙逐渐衰老，现在，它已经有137亿岁了。来自远古的光依然弥漫在宇宙中，但空间一直在飞速膨胀，这些光也逐渐红移（或者说冷却）到了微波波段。所以，我们现在看到的微波背景辐射是宇宙中最古老的光，它是大爆炸留下的余韵。这些微波的波长是2.9英寸（约7.4厘米），大致相当于3K（十分接近绝对零度）下的黑体辐射。

这个发现为大爆炸理论提供了有力的证据。当时仍有不少人支持稳态理论，但大爆炸理论预测了CMB的存在——而彭齐亚斯和威尔逊找到了它。

宇宙年轻时的模样

-

虽然彭齐亚斯和威尔逊认为CMB是各向同性的——也就是说，在所有方向上完全一致——但实际上，它还是有微小的起伏；CMB的温度在3K上下波动，差值在千分之一度以下，但的确存在差别。这幅图实际上描绘了宇宙在38万岁时的模样，那时候距离现在足足有137.7亿年。



黄色和稀少的红色斑块代表光密度较大的区域，也就是在这些地方，物质开始聚集起来，最终形成了恒星和星系。这是我们手中最好的描绘年轻宇宙的地图。

1967

研究人员：

苏珊·约瑟琳·贝尔

研究领域：

天文学

结论：

黑洞的确存在

小绿人真的存在吗？

脉冲星和黑洞

黑洞是怎么被发现的？1783年5月26日，英国教士兼博学家约翰·米切尔给皇家学会的亨利·卡文迪许写了一封长信。他在信中描述了一种比太阳大500倍的球体：

“如果有一个物体从无限高处向它坠落，那么在落到这个球体表面的时候，自由坠落的物体将超过光速，因此，假如光也被同样的力所吸引……这个物体释放出的所有光都会被它自身的引力吸收回去。”

换句话说，米切尔提出了黑洞的概念，这种物体的质量如此巨大，就连光也无法逃脱它的引力。

13年后，法国数学家皮埃尔-西蒙·拉普拉斯在《宇宙系统论》中提出了同样的设想。

1915年，爱因斯坦发表广义相对论以后，人们对宇宙学产生了新的兴趣，黑洞的概念也被重新挖掘出来。德国物理学家卡尔·史瓦西为爱因斯坦的引力场方程求出了一个解，我们可以利用它来推算质点和球形天体的引力场。但是，这个解会得出一个奇怪的史瓦西半径，也就是现在我们所说的“事件视界”——物质可以进入这个球壳，没有任何东西能从里面出来。

那么，从数学上说，黑洞应该存在，但现实世界里真的有这种东西吗？

博士研究生

-

1967年，出生于北爱尔兰的天文学家约瑟琳·贝尔正在英国的剑桥大学攻读博士学位。她的研究课题是寻找类星体，这是一种神秘的新天体。贝尔的第一个任务是把长达数英里的导线穿在木桩上，制造一个射电望远镜——“这让我学会了熟练地使用锤子。”她说。

排除了汽车和空调的严重干扰后，贝尔终于能够静下心来寻找类星体了，不久后，她发现了一个出乎意料的信号——记录数据的表格上出现了些许“浮渣”。为了寻找这些异常数据出现的原因，贝尔好几次在半夜里骑着自行车跑到6英里（约10千米）外的天文台，结果却一无所获。最后，她决定设法放大这些信号，好把它们清晰地记录下来——这些无线电脉冲以1.337秒一次的频率精确地跳动。

外星人的信号？

-

贝尔和她的导师安东尼·休伊什认为，这样有规律的信号一定是人工生成的，但后来她发现，信号实际上来自天空中的某个固定的位置。

有一阵子，贝尔觉得那里一定存在某个外星文明，所以她将脉冲信号命名为LGM-1，也就是“小绿人1号”。然后到了圣诞节前夕，她又

发现了另一个信号LGM-2，这一次脉冲的间隔是1.25秒。难道我们同时找到了两个努力对外联系的外星文明？



最后他们发现，脉冲信号实际上来自中子星。早在1934年就有人预测过中子星的存在，但从来没有人发现过它们。这种天体是大质量恒星坍缩形成的，它全部由中子构成。因为星体内不存在任何电子，所以它的密度极大。直径7英里（约11千米）的中子星质量可达太阳的两倍。

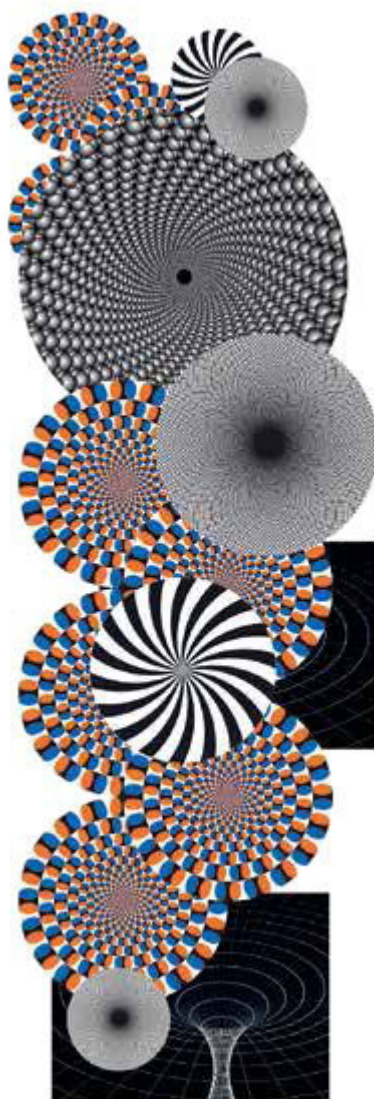
这些高速旋转的天体释放出的无线电束像灯塔的光一样穿越宇宙，传到了贝尔的望远镜里，后来我们将它们命名为“脉冲星”。贝尔发现了最早的4颗脉冲星，后来科学家又发现了2000多颗脉冲星。

1974年，安东尼·休伊什获得了诺贝尔奖，但约瑟琳·贝尔却没有得到这份荣誉。

那么黑洞真的存在吗？

发现中子星以后，人们重新燃起了对黑洞的兴趣，因为现在天体物理学家已经确认，引力坍缩的确有可能发生。我们无法直接观察到黑洞，因为它们不会释放任何光线，不过史蒂芬·霍金指出，黑洞会释放一种非常微弱的红外信号。无论如何，黑洞都会对周围的天体产生影响，比如说，有的恒星会围绕黑洞旋转，我们可以通过这些迹象间接发现它的踪迹。

甚至有这样的可能性：每个星系中央都有一个巨大的黑洞，包括我们的银河系。对银河系中心附近90颗恒星轨道的观测结果表明，银河系中央黑洞的质量应该是太阳的260万倍。



宇宙中似乎存在几种尺寸的黑洞：有的黑洞个头很小，质量和月球差不多；有的略微大一些，质量和太阳差不多；还有巨型黑洞，它们的质量是太阳的数百万倍。黑洞似乎是质量极大的恒星坍缩形成的，较小的恒星会坍缩形成中子星，但有的恒星质量太大，巨大的引力会进一步将中子压缩成一个质点，我们称之为“奇点”。

1998

研究人员：

索尔·珀尔马特

亚当·里斯

布莱恩·P.施密特

研究领域：

宇宙学

结论：

宇宙正在以越来越快的速度膨胀

宇宙正在加速膨胀吗？

我们孤独的未来

今天我们知道，引力是唯一作用于宇宙中所有星系的力，虽然远距离的引力非常微弱，但它却顽固而执着。引力最终会将所有物质重新聚集起来，所以宇宙的膨胀应该逐渐减缓，直至逆转，宇宙从大爆炸开始，最终将以大坍缩结束。可是，事实果真如此吗？

1998年，索尔·珀尔马特与美国、欧洲和智利的20位同行共同发起了超新星宇宙学计划（SCP），试图确认宇宙膨胀减缓的速度，并预测大坍缩将于何时开始。

布莱恩·P.施密特和亚当·里斯是澳大利亚国立大学斯特朗洛山天文台高红移超新星研究小组（HZT）的成员。高红移的超新星离地球非常遥远。HZT的研究目标和SCP一样，他们希望确认宇宙膨胀减缓的速度。

两个研究小组都在测量远距离星系与地球之间的距离和红移。根据哈勃定律，星系的红移与距离有关；天体离地球的距离越远，它发出的光就越偏向于光谱的红色端。来自遥远天体的光需要花费数十亿年时间才能到达地球，根据它们的距离和红移量，研究者可以算出宇宙在远古时的膨胀速度。

他们需要找到一些距离非常遥远的“标准烛光”——我们已经知道这些天体的绝对光度，再加上地球上观测到的光度，天文学家就能算出它们离我们有多远。他们选择了一种名叫“Ia超新星”的天体，如果

白矮星从自己的伴星那里获得了过多的质量，就会发生爆炸，形成Ia超新星。



令人震惊的结果

-

1998年年底，两个小组发表的论文揭示了同一个令人震惊的结果。天文学家比较了这些遥远的超新星的距离和红移量，按照他们的预期，这些超新星应该遵从哈勃定律，或者比哈勃定律的计算结果运动得更快一些。

出乎意料的是，两个小组发现了同样的现象：这些天体的红移量比哈勃定律的计算结果要小得多。这意味着在数十亿年前，超新星爆炸释放出的光离开这些天体的时候，它们的移动速度要比现在慢得多。

换句话说，宇宙一直在加速膨胀。

暗能量

-

“暗能量”又叫“真空能量”，它的效果类似轻微的负压——暗能量像真空一样将宇宙向外拉扯。



宇宙学家告诉我们，暗能量弥漫在空间中，导致星系向外加速运动，所以宇宙膨胀的速度越来越快。现在他们认为，宇宙中只有大约5%的常规物质，还有27%的暗物质，剩下的68%全都是暗能量。

1999

研究人员：

马丁·里斯

史蒂芬·霍金

布莱恩·P.施密特

研究领域：

宇宙学

结论：

宇宙中仍有很多未解之谜

我们为什么会在这里？

我们为什么会在这里？数千年来，这个问题一直困扰着哲学家和科学家。英国皇家天文学家马丁·里斯在1999年出版的著作《六个数》中定义了六个“组成宇宙‘菜谱’的基本数值……如果其中任何一个数‘不协调’，那么恒星和生命都不会存在。这样令人震惊的巧合是否意味着冥冥中真有一位仁慈的造物主？”

里斯表示，这些可能性都不对，但也许其他宇宙会拥有不同的基本常数。他们的物理定律或许与我们的截然不同；同样，他们的化学元素和原子性质也和我们不一样，那些宇宙中或许根本不存在能够演化出生命的小分子。今天的人类只有在所有基本常数都“正确无误”的宇宙里才能演化出来。

史蒂芬·霍金和列纳德·蒙洛迪诺在《大设计》一书中将宇宙比作沸水中的气泡。无数小气泡在沸腾的水中即生即灭，就像那些存在时间极其短暂，根本来不及形成恒星和星系（更别说智慧生命）的宇宙。但是，有些气泡却留存下来，它们在水中上升，不断膨胀，最后终于浮上水面，释放出蒸汽——这代表演化中的宇宙。



人择原理

-

我们的宇宙刚好正适合我们，这就是所谓的“人择原理”。按照强人择原理，宇宙以某种方式被迫形成了能让人类演化至今的样子。而弱人择原理的一个流派则认为，在所有可能的宇宙中，我们只是居住在这个所有参数——也就是里斯提出的“六个数”——都正确的宇宙里而已。

1973年，布兰登·卡特首次提出了“人择原理”这个词，但类似的思想早已经出现。1904年，阿尔弗雷德·拉塞尔·华莱士曾经写道：

“我们周围的宇宙如此广袤而复杂，或许必须要有这样的宇宙……才能创造出每一个细节都精确无误的世界，让生命有序地发展，最终孕育出人类。”

“正确”的宇宙从哪里来？

-

里斯打了个比方，你走进一家大型服装店，发现他们库存丰富，款式繁多，所以你总能找到适合自己的那一件。同样，如果大爆炸也不止发生了一次，而是很多次，那么其中某一次大爆炸正好产生了一个所有参数都适合我们的宇宙，这似乎也很合理。所以，在我们的宇宙之外，或许还有数十、数百甚至数百万个其他的宇宙。

量子世界

-

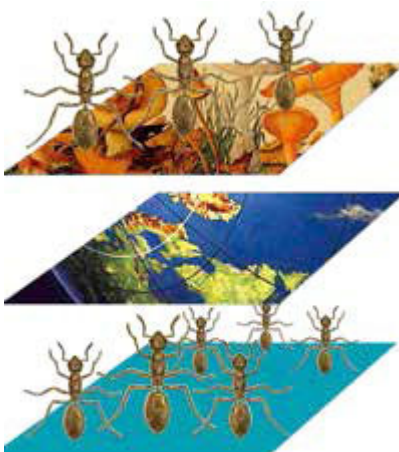
光子似乎能够同时穿过两条狭缝，沿两条路径传播。理查德·费曼提出，这是因为在量子世界里，光子没有确定的路径，恰恰相反，它会沿着所有可能的路径传播。所以在宇宙诞生的那一刻，它或许也会走上所有可能的道路，创造出多个不同的宇宙，其中大部分都迥异于我们的这一个。

这听起来很像是休·艾弗雷特的量子力学“多世界诠释”。如果薛定谔的猫在一个世界里已经死去，而在另一个世界里却还活着，那么宇宙或许真的不止一个——但这意味着观察者在打开盒子的刹那创造出了一个新的宇宙。

此外，我们自己的宇宙就已经辽阔得超乎想象了。我们的银河系拥有2000亿颗恒星，其中大部分恒星都拥有行星。除了银河系以外，宇宙中至少还有其他1000亿个星系，每个星系中都有无数恒星，它们很可能也拥有行星。如果这一切都是为了我们而创造出来的，那可真是够多的，观察者仅仅打开了一个盒子，就能创造出这么多东西吗？

如果真的存在其他宇宙，为什么我们看不到它们？

一群蚂蚁在一张二维的纸上忙忙碌碌，它们或许不会知道，就在自己头顶几英寸外还有另一张纸，上面居住着另一群蚂蚁。上面这张纸就是另一个宇宙，它通过三维的空间与另一张纸隔离开来，下面的蚂蚁无法爬上头顶的那张纸。



同样，其他宇宙或许也存在于另一个维度上，所以我们完全无法接触。它离我们也许只有咫尺之遥，但我们却对此一无所知。“M理论”是一套复杂的物理学理论，这套理论提出，一共存在11个维度——足以容纳其他宇宙。

从另一个方面来说，既然我们无法与其他宇宙发生任何互动，那么为什么要假设它们存在呢？按照奥卡姆剃刀原理，无论面对什么现象，我们都应该寻找最简单的解释，所以，或许我们应该彻底抛弃这些虚幻的宇宙。

2007

研究人员：

唐·波勒等人

研究领域：

天文学

结论：

我们的银河系里有很多适合居住的系外行星

我们是宇宙中唯一的智慧生物吗？

广角寻找行星计划和超广角寻找行星计划

1995年10月6日，在法国东南部的上普罗旺斯天文台工作的瑞士科学家米歇尔·梅耶和迪迪埃·奎洛兹宣布，他们发现了另一个太阳系里的一颗行星。它的正式名称叫“飞马座51b”。

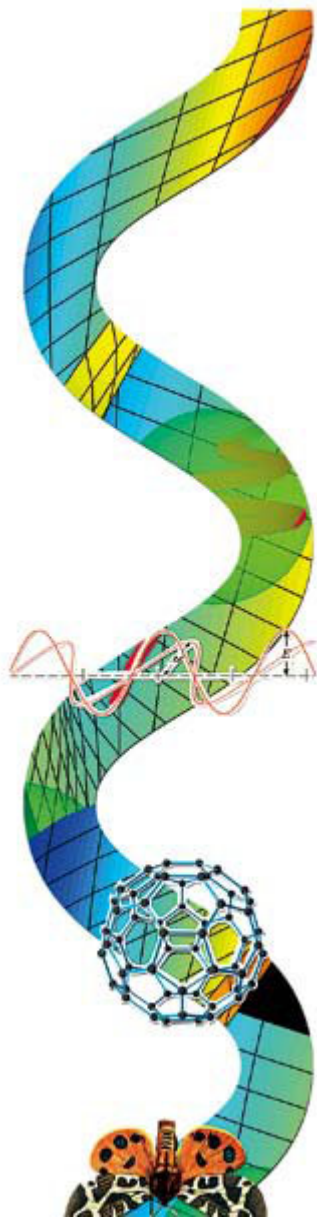
这是人类发现的第一颗围绕常规恒星运行的系外行星。

宇宙中还有其他生命吗？

-

确认了系外行星的确存在以后，天文学家立刻开始积极地寻找其他行星。如果我们在宇宙中并不孤单，那么其他类似地球的行星上或许也存在生命。

然而，“行星猎人”面临的最大问题在于，行星不会发光。我们很容易看到恒星，但行星既小又暗，而且常常被恒星的光芒掩盖。

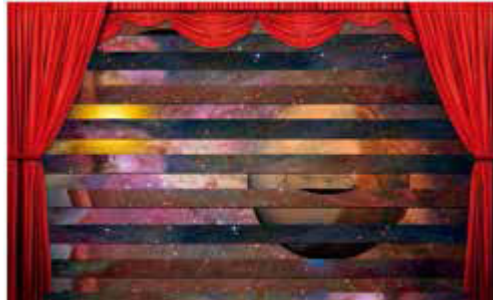


遮挡星光

-

唐·波勒和爱尔兰北部贝尔法斯特女王大学的同行找到了一种简单的搜索方法。他们推测，宇宙中可能有很多系外行星，其中某一颗在公转轨道上运行时偶尔会从恒星前方经过，挡住一部分星光。所以，

如果我们观察到某颗恒星的亮度出现了周期性的轻微变化，那么很可能就是行星遮挡造成的。



数码相机

-

这群聪明的科学家买了4个7.9英寸（约200毫米）f/1.8的佳能高科技数码镜头。在剑桥大学、加那利天体物理研究所和艾萨克·牛顿望远镜集团的帮助下，他们把这些镜头安装在西撒哈拉海滨加那利群岛拉帕尔马岛一座山顶上的玻璃纤维小屋里。他们的项目名叫“广角寻找行星计划”，简称WASP。后来女王大学和公开大学追加了资金，于是他们又买了4个镜头，并将项目更名为“超广角寻找行星计划”（Super WASP）。2002年，这个计划正式启动。

不过，他们遇到了一个小问题。佳能公司已经不再生产那种7.9英寸的镜头了，所以波勒的第二批镜头是从易贝网上买的。

8个镜头安装在同一个机械臂上，角度略有差异，以便覆盖天空中更大的范围。

恒星照片

-

8个镜头各自会拍摄2张不同曝光时间的照片，随后机械臂会移动到另一片天空，所有镜头各自再拍2张照片，如此循环，直至覆盖整片天空，然后再从头开始。

每个夜晚，所有镜头拍摄的照片加起来大约有600张，每张照片里的恒星数量多达10万颗。比对照片和天文星表，就能识别出每一颗恒星，然后他们会测量每颗恒星的亮度。最开始的几个月，研究者主要的工作是建立恒星亮度的数据库，然后他们开始寻找周期性变暗的恒星，那可能是行星凌日造成的。

如果行星的体积很大，恒星的亮度就会出现明显的变化；如果这样的变化出现得比较频繁——要是行星与恒星的距离很近，它的公转周期就比较短，所以会更加频繁地遮挡恒星——比如说每隔几天就出现一次，那么天文学家就更容易发现它。这类行星被称为“热木星”（例如飞马座51b）。热木星相当常见，但这种行星不太可能拥有生命，因为它们表面的温度太高，所以没有液态水，而且它们的引力也太大，不适合生命存活。

系外行星的盛宴

-

2007年，超广角寻找行星计划公布了他们找到的第一颗系外行星——WASP-1。这是一颗热木星，公转周期仅有2.5天。WASP-12b离恒星太近，所以它的表面温度高达2800°F（1500°C）左右，在巨大的引力作用下，它被拉成了橄榄球的形状。截至2015年，超广角寻找行星计划一共发现了超过100颗系外行星。

或许是受到了超广角寻找行星计划的激励，2009年，NASA发射了开普勒号飞船，它将连续观测14.5万颗恒星，检测是否有凌日现象。到目前为止，开普勒计划已经发现了超过1000颗系外行星，另外还有3000颗可能的行星。



现在天文学家相信，或许大部分恒星都拥有自己的行星系统，也许单是银河系里就有110亿颗处于古迪洛克区间的岩石类地行星。当然，在这110亿颗行星中，或许某一颗上面就有达尔文所说的“温暖的小池塘”，池塘里孕育着鲜活的生命。

2009

研究人员：

彼得·希格斯和12000位来自100个国家的科学家

研究领域：

粒子物理

结论：

我们可能已经找到了希格斯玻色子

我们能找到希格斯玻色子吗？

大型强子对撞机

物质主要由质子、中子和电子组成，但除此以外，科学家又发现了许多更小的粒子，例如中微子和夸克。经过几十年的努力，这些粒子被统一到了一套“标准模型”里。

1964年，苏格兰爱丁堡大学的彼得·希格斯提出，标准模型内应该有一种特殊的粒子，它赋予了其他所有粒子质量。这个小家伙应该是某种玻色子——但从未有人发现过它的踪迹。



对撞机

-

运动速度越快的粒子破坏力越大——但与此同时，它们也蕴藏着更多的秘密。所以物理学家想了很多办法来将粒子的速度推向极限。他们先发明了静电加速器，后来又制造出了直线加速器，这种设备内部有一系列电场，每个电场都会让粒子的速度变快一点点。

电极携带的电荷与粒子的电性相反，在引力的作用下，粒子飞速靠近电极板。电极板上有一个洞，就在粒子穿过洞口的一瞬间，电极的电性会发生改变，此时粒子在斥力的作用下继续加速，飞向下一块

电极板——这个过程在直线加速器内部不断循环重复，粒子的速度也越来越快。

随后物理学家发明了回旋加速器，它的原理与直线加速器一样，只不过整套装置被弯成了环形。研究者利用电磁铁将粒子引入回旋加速器，这些粒子在加速器里一圈又一圈地旋转，速度变得越来越快，最终，粒子携带的能量可达1500万电子伏（eV）。同步加速器是回旋加速器的进阶版本，这种加速器内部的磁场可以与运行中的粒子束保持同步。

大型强子对撞机（LHC）

-

从理论上说，强子是由夸克通过强作用力捆绑在一起的复合粒子。质子——氢原子核（ H^+ ）——就是一种强子。物理学家建造大型强子对撞机的初衷是利用直线加速器和同步加速器加速强子，尤其是质子。

LHC位于法国和瑞士边境地下约328英尺（约100米）处的一条环形隧道里，这条隧道宽约12英尺（约3.7米），长达17英里（约27千米）。隧道里安装了一对直径约4英寸（10厘米）的管子，粒子束就在这两根管子里运动。其中一束粒子沿顺时针方向运动，另一束的运动方向与它相反。两根管子组成了一个巨大的同步加速器。

进入管道之前，质子需要先经过一个直线加速器和三个连续的同步加速器；而在进入管子以后，质子将得到进一步加速，20分钟后，它们将达到99.999999%光速——也就是说，这些质子每秒运动的距离只比光少3米，此时它们携带的能量达到了大约4亿电子伏（想想看，

当年戴维森和革末使用的粒子能量只有50电子伏）。每个质子每秒将围绕16.7英里（约27千米）长的隧道转动11000圈。

1600套超导磁铁约束和引导着粒子的方向，每套磁铁自重近30吨，96吨液氦让它们始终保持着1.9K（-456°F或-271°C）的超低温度。

隧道内有4个交点，两条加速管在这几个位置汇合到一起，好让对向高速运动的质子发生碰撞。每个交点周围都安置了各种各样的探测器，以便检测粒子碰撞后的反应并观察它们产生的碎片。

对撞机全功率运行时，管内每秒都会发生数百万次碰撞，每次碰撞都会产生几道粒子束，探测器会自动记录这些粒子的轨迹，有点像是高科技版本的云室。然后，海量的数据通过一套复杂的计算网络被分配到36个国家的170台计算机里，完成下一步的分析。

2009年11月23日，LHC进行了第一次试撞，接下来的几个月里，这台巨型设备一直在全功率运行。

目标

-

物理学家希望确认希格斯玻色子是否真的存在，除此以外，他们还想解开粒子物理学领域的其他重大谜团——比如说，寻找宇宙中27%的神秘“暗物质”和“超对称理论”预测的新粒子。

结果

-

目前，研究者已经发现了几种新的复合强子。他们还观察到了一种夸克-胶子等离子体，科学家认为，在大爆炸刚刚发生后的几毫秒内，宇宙完全是由这种“夸克汤”组成的。除此以外，他们还观察到了一种罕见的粒子衰变，这为超对称理论的反对者提供了有力的证据。最重要的是，他们看到了神秘的希格斯玻色子存在的证据。



索引

Alexander the Great 亚历山大大帝

Alhazen 海什木

Ampère, André-Marie 安德烈-马里·安培

Anderson, Carl 卡尔·安德森

Arago, Francois 弗朗索瓦·阿拉戈

Aston, Francis William 弗朗西斯·威廉·阿斯顿

Avogadro, Amedeo 阿梅代奥·阿伏伽德罗

Baade, Walter 沃尔特·巴德

Banks, Joseph 约瑟夫·班克斯

Becquerel, Antoine Henri 安东尼·亨利·贝克勒尔

Bell, Susan Jocelyn 苏珊·约瑟琳·贝尔

Bertha, Anna 安娜·柏莎

Black, Joseph 约瑟夫·布莱克

Blackett, Patrick 帕特里克·布莱克特

Bradley, James 詹姆斯·布拉德雷

Bragg, William Henry 威廉·亨利·布拉格

Bragg, William Lawrence 威廉·劳伦斯·布拉格

Brahe, Tycho 第谷·布拉赫

Burnell, Jocelyn 约瑟琳·伯奈尔

Carter, Brandon 布兰登·卡特

Cassini, Giovanni Domenico 乔凡尼·多美尼科·卡西尼

Cavendish, Henry 亨利·卡文迪许

Clausius, Rudolf 鲁道夫·克劳修斯

Compton, Arthur 阿瑟·康普顿

Conduitt, John 约翰·康杜特

Copernicus, Nicolaus 尼古拉斯·哥白尼

Crookes, William 威廉·克鲁克斯

Curie, Pierre 皮埃尔·居里

Daguerre, Louis-Jacques 路易斯-雅克·达盖尔

Davidson, Charles 查尔斯·戴维森

Davisson, Clinton 克林顿·戴维森

Davy, Humphry 汉弗里·戴维

de Broglie, Louis 路易·德布罗意

Descartes, Rene 勒内·笛卡儿

Dicke, Robert 罗伯特·迪克

Dirac, Paul 保罗·狄拉克

Dyson, Frank Watson 弗兰克·沃森·戴森

Eddington, Arthur 阿瑟·爱丁顿

Edison, Thomas 托马斯·爱迪生

Elsasser, Walter 瓦尔特·爱尔沙色

Empedocles 恩培多克勒

Eratosthenes 埃拉托斯特尼

Euclid 欧几里得

Everett, Hugh 休·艾弗雷特

Fermi, Enrico 恩里科·费米

Feynman, Richard 理查德·费曼

Fizeau, Hippolyte 希波莱特·斐索

Fletcher, Harvey 哈维·弗莱彻

Foucault, Leon 莱昂·傅科

Franck, James 詹姆斯·弗兰克

Franklin, Benjamin 本杰明·富兰克林

Friedman, Alexander 亚历山大·弗里德曼

Galvani, Luigi 路易吉·伽伐尼

Geiger, Johannes Wilhelm 汉斯·盖革

Geissler, Heinrich 海因里希·盖斯勒

Gerlach, Walther 瓦尔特·格拉赫

Germer, Lester 雷斯特·革末

Gilbert, William 威廉·吉尔伯特

Goldstein, Eugen 欧根·戈尔德斯坦

Goudsmit, Samuel 塞缪尔·高斯密特

Guericke, Otto von 奥托·冯·居里克

Hafele, Joseph 约瑟夫·哈菲尔

Halley, Edmond 爱德蒙·哈雷

Hawking, Stephen 史蒂芬·霍金

Hertz, Gustav Ludwig 古斯塔夫·路德维希·赫兹

Hess, Victor 维克多·赫斯

Hewish, Antony 安东尼·休伊什

Higgs, Peter 彼得·希格斯

Hooke, Robert 罗伯特·胡克

Hoyle, Fred 弗雷德·霍伊尔

Hubble, Edwin 爱德文·哈勃

Hutton, Charles 查尔斯·赫顿

Huygens, Christiaan 克里斯蒂安·惠更斯

Joule, James Prescott 詹姆斯·普雷斯科特·焦耳

Keating, Richard 理查德·基廷

Kelvin, William Thomson, Baron 威廉·汤姆森·开尔文男爵

Laplace, Pierre-Simon 皮埃尔-西蒙·拉普拉斯

Lavoisier, Antoine 安东尼·拉瓦锡

Lemaitre, Henri 亨利·勒梅特

Lenard, Philip 菲利普·莱纳德

Marsden, Ernest 欧内斯特·马士登

Maskelyne, Nevile 内维尔·马斯基林

Mason, Charles 查尔斯·曼森

Maurer, Stephen 史蒂芬·莫勒

Mayor, Michel 米歇尔·梅耶

Michell, John 约翰·米切尔

Michelson, Albert A. 阿尔伯特·A. 迈克尔逊

Millikan, Robert Andrews 罗伯特·安德鲁斯·密立根

Minkowski, Hermann 赫尔曼·闵可夫斯基

Mlodinow, Leonard 列纳德·蒙洛迪诺

Morgan, John Pierpont 约翰·皮尔庞特·摩根

Morley, Edward W. 爱德华·W. 莫雷

Norman, Robert 罗伯特·诺曼

Onnes, Heike Kamerlingh 海克·卡末林·昂内斯

Oort, Jan 扬·奥尔特

Orsted, Hans Christian 汉斯·克里斯蒂安·奥斯特

Pascal, Blaise 布莱兹·帕斯卡

Pasteur, Louis 路易·巴斯德

Pauli, Wolfgang 沃尔夫冈·泡利

Peebles, Jim 吉姆·皮布尔斯

Penzias, Arno Allan 阿诺·阿兰·彭齐亚斯

Perier, Florin 佛罗林·佩里埃

Perlmutter, Saul 索尔·珀尔马特

Planck, Max 马克斯·普朗克

Pollacco, Don 唐·波勒

Power, Henry 亨利·鲍尔

Ptolemy, Claudius 克劳狄乌斯·托勒密

Queloz, Didier 迪迪埃·奎洛兹

Rabi, Isidor 伊西多·拉比

Ramsey, Norman F. 诺曼·F. 拉姆齐

Rees, Martin 马丁·里斯

Rhodes, Richard 理查德·罗兹

Riess, Adam 亚当·里斯

Romer, Ole 奥勒·罗默

Rontgen, Wilhelm Conrad 威廉·康拉德·伦琴

Rubin, Vera 薇拉·鲁宾

Rumford, Benjamin Thompson, Count 本杰明·汤普森·伦福德伯爵

Sakharov, Andrei Dmitrievich 安德烈·德米特里耶维奇·萨哈罗夫

Schmidt, Brian P. 布莱恩·P. 施密特

Schrodinger, Erwin 埃尔温·薛定谔

Schuster, Arthur 阿瑟·舒斯特

Schwarzschild, Karl 卡尔·史瓦西

Sommerfeld, Arnold 阿诺德·索末菲

Sprengel, Hermann 赫尔曼·斯普伦格尔

Stern, Otto 奥托·施特恩

Stukeley, William 威廉·斯蒂克利

Szilard, Leo 利奥·西拉德

Tamm, Igor Yevgenyovich 伊戈尔·叶夫根耶维奇·塔姆

Tesla, Nikola 尼古拉·特斯拉

Thales (mathematician) 泰勒斯（数学家）

Theodoric of Freiberg 弗莱贝格的狄奥多里克

Thomson, Joseph John 约瑟夫·约翰·汤姆森

Towneley, Richard 理查德·汤利

Uhlenbeck, George 乔治·乌伦贝克

Volta, Alessandro 亚历山德罗·伏特

Wallace, Alfred Russel 阿尔弗雷德·拉塞尔·华莱士

Watt, James 詹姆斯·瓦特

Westinghouse, George 乔治·威斯汀豪斯

Wilkinson, David 大卫·威尔金森

Wilson, Rees 里斯·威尔逊

Wilson, Robert Woodrow 罗伯特·伍德罗·威尔逊

Wollaston, William Hyde 威廉·海德·沃勒斯顿

Wren, Christopher 克里斯多佛·雷恩

Young, Thomas 托马斯·杨

Zhang Heng 张衡

Zwicky, Fritz 弗里茨·兹威基

词汇表

α 粒子（alpha particle）——氦原子核，由2个质子和2个中子组成。

蓝移（Blueshift）——波长变短或频率升高。

阴极射线（Cathode rays）——真空中阴极产生的电子流。

暗物质（Dark matter）——一种看不见的物质，大约占据宇宙总质量的84.5%。

事件视界（Event horizon）——黑洞的边界，任何东西都可以从外部进入事件视界，却无法从里面出来，甚至包括光（不过黑洞的确会释放少量辐射，我们称之为“霍金辐射”）。

系外行星（Exoplanet）——太阳系以外的行星，它们围绕其他恒星旋转。

惯性参考系（Inertial frame of reference）——静止或匀速直线运动的参考系，它没有加速度。

M 理论（M-theory）——粒子物理领域的一种理论，由“弦论”发展而来。这套理论试图解释宇宙中的所有粒子和能量。

光电效应（Photoelectric effect）——一些金属在受到光照时会释放出电子。

光子（Photon）——光能单位；一小包光波。

等离子体（**Plasma**）——物质主要有三种态：固态、液态和气态。等离子体是第四种态，在这种状态下，所有粒子都是离子化的（比如说，火焰就是一种等离子体）。

多相系统（**Polyphase**）——利用三个以上的电导体分配交变电流的系统。

正电子（**Positron**）——一种反物质粒子，它的性质类似电子，但携带的是正电荷。

红移（**Redshift**）——波长变长或频率降低。

闪烁（**Scintillation**）——粒子击中荧光屏发出的闪光。

SI 单位（**SI units**）——国际度量单位。

光谱仪（**Spectrometer**）——测量原子光谱的设备。

自旋（**Spin**）——量子力学体系下粒子的角动量。

量子态叠加（**Superposition**）——根据量子力学的哥本哈根诠释，一个粒子可以同时处于两个或两个以上的位置。

超对称性（**Supersymmetry**）——粒子物理标准模型的扩展，它预测了每种粒子都有相应的对称粒子。

热电偶（**Thermocouple**）——一种测量温度的设备，由两种不同的金属连接组成。

铀（**Uranium**）——一种放射性金属重元素

致谢

非常感谢西尔维亚·朗格弗德邀请我撰写本书，让我有机会写一写这么多老朋友；尤其感谢斯拉夫·托多罗夫和迈克尔·贝里爵士，他们帮助我攻克了相对论的难关；感谢我曾经的同事保罗·贝德、马蒂·约普森和约翰·弗朗卡斯，是你们让我认识了这么多古代的科学家的。



未读 Club

为读者提供有温度、有质量、有趣味的
泛阅读服务



专属社群 独家福利
精品共读 活动特权

手机扫码
加入未读 Club 会员计划

未讀

黑夜、黑体、黑洞、暗物质、暗能量

这些神秘概念为何被冠以黑暗之名？

LES IDÉES NOIRES

给 Roland Lehoucq 好奇者的
Vincent Bonfems

DE

暗黑物理学

北京联合出版公司

不知黑，焉知宇宙？

只看过霍金讲宇宙，你将错过宇宙一半的精彩

黑夜、黑体、黑洞、暗物质、暗能量

讲述它们引发的一场场科学革命，探索它们暗藏种种文化隐喻

LES IDÉES NOIRES DE LA PHYSIQUE 附赠超酷【暗黑物理学】明信片

Roland Lehoucq / Vincent Bonfems

〔法〕罗兰·勒乌克 文森特·博滕斯——著 张芳——译

版权信息

给好奇者的暗黑物理学

Les idées noires de la physique

作者：[法] 罗兰·勒乌克（Vincent Bontems） [法] 文森特·博滕斯
（Roland Lehoucq）

译者：张芳

出品方：未读·探索家

出版社：北京联合出版公司

目录

[版权信息](#)

[前言 物理学中的黑概念](#)

[Part 1](#)

[A 黑色的夜空](#)

[膨胀的宇宙](#)

[最古老的光是何时发出的？](#)

[我们能看到宇宙视界之外的地方吗？](#)

[B 为什么夜空是黑色的](#)

[星座的黑色盒子](#)

[黑的选择](#)

[Part 2](#)

[A 黑体](#)

[黑体之谜](#)

[黑体是真实存在的吗？](#)

[最冷的黑体](#)

[B 黑体辐射](#)

[物体的暗黑性](#)

[黑射线](#)

[Part 3](#)

[A 黑洞](#)

[黑洞是什么？](#)

[在黑洞视界的边缘](#)

[在怪物的肠道中](#)

[一个不是那么黑的洞.....](#)

[宇宙旋涡](#)

[B 黑洞引力](#)

[宇宙坍缩](#)

[忧郁的星体](#)

[黑洞的光辉](#)

[Part 4](#)

[A 暗物质](#)

[暗物质的发现](#)

[星系中的暗物质](#)

[星系团中的暗物质](#)

[宇宙幻象](#)

[宇宙中的暗物质](#)

[原始核聚变](#)

[一个新的定律？](#)

[暗物质的属性可能是什么？](#)

[B 暗物质的炼金术](#)

[一种比黑色更黑暗的黑](#)

[苦炼](#)

[宇宙的阿尼玛](#)

[宏观宇宙和微观宇宙的结合](#)

[Part 5](#)

[A 暗能量](#)

[令人惊奇的观测结果](#)

[解释的过剩](#)

[B 暗能量之谜](#)

[黑暗的教训](#)

[谁会杀死宇宙？](#)

[实体的迷幻](#)

[不必失望：并非一切都是黑色的！](#)

[结语 黑色的统治](#)

[返回总目录](#)



前言 物理学中的黑概念

黑暗，构成了一个世界。

——亨利·米修^[1]，《杂乱的无限》（*L'Infini turbulent*）

物理学中有很多与黑暗相关的概念，比如“黑色的夜空”“黑体”“黑洞”“暗物质”“暗能量”，正是黑暗勾起了我们的求知欲。我们两个，一个物理学家，一个哲学家，之所以会合作，是因为科学概念上的“黑”既有教育意义，又发人深思。为什么物理学家认为需要“黑化”这些概念？这个从普通语言中借用的词是什么意思？它对科学语言的制定是无足轻重且无甚影响，还是其中隐约包含着某种隐喻？总之，物理学中的黑概念会因为它们的“黑”而拥有特殊性吗？对于构想出这些黑概念的人来说，“黑”在我们这个时代的科学文化中又意味着什么呢？

尽管笔者非常欣赏安德烈·弗朗坎^[2]的黑色幽默代表作《黑思想》，但是我们的书并不会涉及神经衰弱的物理学家们脑中阴郁的反复思考，而是关于“黑化”一些现象而产生的物理概念及其特殊性的反思。这种“黑化”是否意味着这些概念是相关的呢？但至少有一个值得注意的事实存在，而且应该为它写本书，那就是：这些概念都与过去或者现在的重要科学谜团有联系。几百年来，黑色的夜空让天体物理学家们魂牵梦萦；黑体辐射之谜是量子力学的起源；黑洞理论极具特殊性，在人们发现它的效应之前，天体物理学家就已经为之兴奋；暗物质是解决星系和星系团运动异常的假说；而暗能量则可以解释宇宙加速扩张的原因！关于这些黑概念存在进一步思考，然而这些可能和它们的黑化并没有直接关系。

黑，一定是因为光的完全缺失。但是在物理学中，黑却有特殊的意义。黑体并不一定是黑色的，黑洞也与颜色无关：它只是无法被看到。黑被归类为肉眼无法观察到的物理现象，这个特点因现象而异——天空的黑和暗能量的黑不同，但是观察的难度也会严重影响归类

的结果。一个概念被定义为黑并不是偶然的。在科学语言中，形容词“黑”上发生了一个被加斯东·巴什拉^[3]称为“语义革命”的变化：它的意思改变了。它的原始含义被提纯了，被重新定义了，这样它就只被用来表达物理学家需要它表征的对象属性了。于是，黑不再是一种颜色，而是成了一个单义的科学术语。

其实，这是科学家努力想要达到的结果。

必须承认，由于某个词语在普通语言中已经具有了含义，因此这样的发源总会留下痕迹，它会默默影响科学的表达方式，也会带给这种表达方式一丝隐喻的意味。就好像物理学家关于黑概念的学说都有一个黑色影像的光圈如影随形。在物理学家做论证时，他必须摆脱这些黑色的影像，才能使自己的理论建立在清晰和鲜明的概念与精细的公式和算法上，可是这并不表示这些黑色的影像不存在，它们必定存在于物理学家无尽的遐想中。因此为了理解这些黑概念，不仅需要分析物理学是如何把“黑”这个形容词的字面意思，做了深刻的变化，还要阐释这个既可以表颜色的形容词，又可以用作科学短语的词汇是如何获得这些含义的。每一个黑概念都对应着一个黑色的图像（或影像），就像是通过语言将影子投射在想象中一样。掌握这些黑概念的物理学家可以不去理会这些黑色的图像，但这恰好证明他必须在这些图像干扰科学思维的时候将它们摆脱掉，或者在被它们激发起好奇心时将它们升华。因为我们无法用这些图像来完成推理，但是也无法将思维和图像完全分离。我们不能将二者混淆，也不能将它们错误地融为一体，于是我们决定在这本书中，既从认识论和历史角度分析这些黑概念的科学含义，同时也探索黑色图像的象征意义。

与此同时，我们会继续加斯东·巴什拉的研究。巴什拉是第一个将认识论分析与心理学分析的一种特殊形式相结合，并使用这种分析方法的人。1938年，他出版了两部既不相同又互为补充的著作：《科学精神的形成》和《火的精神分析》（全书名为《火的客观意识的精神分析》）。在《科学精神的形成》中，他解释了科学精神必须首先克服“认识论障碍”，因为它们会妨碍和阻止科学精神对现象进行精密的思考，这些障碍往往只是普通语言所建立起来的想象。在《火的精神分析》中，他研究了一些与火相关的图像来证明它们之间的关联并不是随机的：它们之间的联系方式虽然与逻辑关系完全不同，却是非常精确的。在这位著名先驱的启发下，我们首先要点明物理学中每一个黑概念的含义，以及与这些概念相应的黑色图像的含义，留待读者来

判断这些学术上的含义与隐喻的含义是否不可分割、相互补充或者相互交错。但是，在开始从黑色的夜空到暗能量的旅程之前（我们还会谈到黑体、黑洞和暗物质），我们先试着确定一下物理学中“黑”字在研究者脑中的笼统含义，以及“黑”字在诗人和幻想者的脑中会产生什么样的图像。

* * *

为什么物理学会将一些物质看成黑色的呢？为了回答这个问题，我们首先要知道“看”在物理学中是什么意思。长久以来，物理学家不再通过自己的肉眼感觉来观察现象，而是使用工具：从伽利略的天文望远镜到各种显微镜、分光镜，再到最近的粒子加速器。这些探测仪器可以让我们与一些本来无法感知到的现象进行互动。著名的“观察者”就是一个机器。科研人员会首先介入，做出预测，准备实验并校准探测器，在观察之后，说明结果，纠正自己的假说，并得出必要的结论。可是，在观察期间，技术才是最重要的。为了强调技术干预的重要性，巴什拉创造了一个新词——“现象技术”（《新科学精神》，1934年）。这个混合词是将现象与技术联系在了一起，它意味着，从此以后，“现象”的意思发生了变化。它的传统定义是“主动展现给大家看的东西”，而科学现象不是“主动展示”，它是通过实验建立起来的。亚里士多德是绝不会做实验的，因为这是对大自然的侵犯。19世纪，实证主义者依然将实验作为检验先验现象的衡量标准，然后试图用数学规律对现象进行描述。在当代科学研究中，“新的现象不是简单地被发现，而是被创造，被一点一点建立起来的。”（《研究》，19页）研究者不是观察“事实”，而是根据理论的数学结构，通过使用高精准的技术来创造“效果”。因此，“看”意味着在物理理论的基础上创造现象技术，而这个现象技术（可能）会使一些新的甚至预想不到的现象显现出来。

乍一看，这样的观察方式只适用于粒子物理学这样的实验科学，而不适用于天文学这样的观测科学，因为在观测科学中，我们无法按照自己的意愿创造现象。然而，现象技术不只应用于粒子加速器，也出现在天文观测台。研究者们通过信号来观察宇宙，这些信号有时很微弱，它们的波长不在可见光谱的范围内，甚至是靠光子以外的其他粒子来传播的。研究者的仪器可以让我们看到肉眼不可见的现象。基于抽象的假设和复杂的运算，天文学家制造出一些高端的仪器来搜集隐藏于其他波长中的信息。“看”的含义始终是“与现象进行互动，对这

个互动进行测量并从中获得与现象相关的信息”。第一个信息的传播媒介是光，科学家自然而然地在他们的非正式语言中保留了和视觉相关的词汇。然而大部分的时间里，被研究的现象不是与光、声波或中微子相互作用，而是与其他频次的电磁波相互作用。即使光不再参与互动，现象技术也必须能够接收和计量与被观测的系统互动时所产生的信息。

现在，我们已经确定了“看”对于一个物理学家意味着什么，那么我们就能毫不费力地猜出他赋予“黑”的含义：基本上，就是他看不到或者看不清的东西。在物理学中，黑代表抵抗探测的物质，不会和电磁波相互影响的物质，或者该物质与电磁波以某种方式发生互动，而以我们目前拥有的现象技术无法接收到相关信息。黑色天空的谜团已经用它自己的方式提出了疑问：恒星的光本应该从各个方向到达我们的眼中，可我们为什么却感知不到呢？黑体将所有的电磁波吸收却不发出任何反射；黑洞是一个实心的天体，这所有人都知道，它使光线无法逃脱引力的影响（物质自然也一样）；暗物质是一个关于物体质量与光线不会相互影响的假设；最后，暗能量可能是最晦涩的概念：它不仅无法被观察到，而且还可能是对抗万有引力的一个力量来源。

所有这些黑概念，虽然混杂，但从概念层面讲，总和“黑”或“暗”有一些关联：它们被应用在物理学家无法看到的现象上。在这本图文结合的书中，我们要强调指出的是，这些黑概念生出了一些问题，而这些问题是我们正在试图了解或者还无法弄清楚的。它们的情况难以阐明：这究竟是事实，还是暂时无法证实的理论可能，抑或只是空想？

* * *

除了关于黑概念的认识论分析，我们还将使用“黑暗的精神分析法”。在《火的精神分析》一书中，巴什拉发明了一种新型的、独特的精神分析法。这种方法不是要记录一个静止地搁在沙发上的火焰的秘密，而是要统计火的形象和象征，因为自远古以来，火激发了人类无穷的想象，火的破坏性也阻碍了人类的认知。巴什拉的精神分析法旨在荡涤束缚科学精神的形象。因为火的古老形象并不是客观的。这些形象阻碍了人类对燃烧现象的理解。为了摆脱束缚，科学精神始终需要对抗自身的自然倾向，比如它会把一种物质归于热量，再将热量理解为一种微妙的气体。巴什拉希望将我们的精神从这些给我们造成混

乱的形象中解放出来。在这里我们强调，巴什拉的这个计划是有悖传统的，而它很快就会被一些更加精妙、更加形象的分析所取代。因为，这位来自奥布河畔巴尔地区的哲学家最终会被自己所研究的隐喻的魅力深深吸引。他乐此不疲地详尽地描述火焰的形象，宣称要把我们从火奇怪的“复杂”中解放出来。

我们也想本着这样的精神做研究，尽可能使黑色形象的学术特征（目的是让每一个遐想都明确意识到想象对理念的扭曲，即使这想象因理念而生）和自由联想的荒谬特点（目的是让遐想保有自发性。遐想不是理念的仿制品，而是我们的文化共鸣的结果）两者之间达成平衡。

尽管如此，人们可能会考虑“黑”是否契合这个研究。在巴什拉看来，火因其在人类进化中扮演着至关重要的角色，是集体想象中至关重要的元素。那对于“黑”来说，情况相同吗？巴什拉还写过其他一些关于火的诗集，以及关于水、空气、土的作品。他以此证实了一个观点，那就是只有用于炼金术的四种元素（空气、水、火、土）是构成集体想象的最重要物质。然而仔细想来，这个论点是武断的。如果火的形象是从人类能够使用火的那一刻开始根植于集体想象中的，那么在此之前，夜晚的黑暗笼罩了我们那么久，我们又该如何描述这个更加古老、更加强大的形象呢？

巴什拉在他的《水与梦：论物质的想象》中研究了“黑水”的形象，他自己也做出了这样的思考：如果黑水的形象是融合了水和夜晚的形象，那么岂不是应该承认夜晚和水一样，是原始而深刻的想象实体吗？

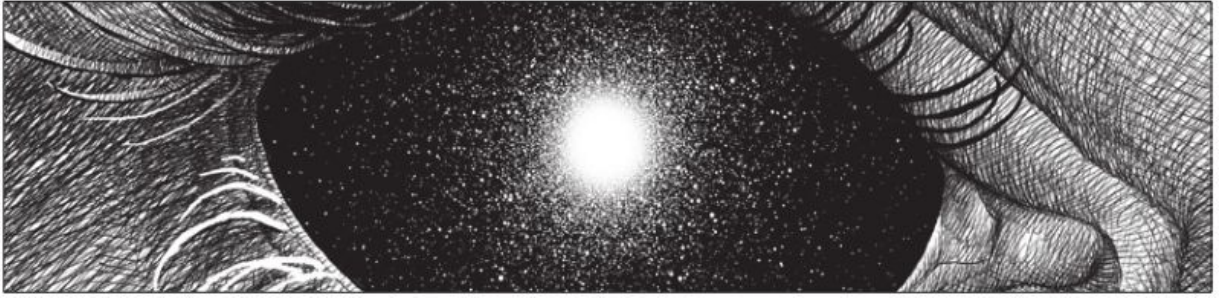
当我们要对水与夜的结合发表一些见解时，似乎与我们关于物质想象的总的观点相违背……然而，物质的遐想是如此自然，如此不可抗拒，以至于想象通常会接受这个梦幻，这个出现在积极的夜晚、深邃的夜晚、潜进的夜晚、进入各种事物中去的夜晚的梦幻。此时，夜不再是一位蒙着黑纱的女神，也不再是帷幕，遮挡着大地和大海；夜是夜晚，夜是一种实体，夜是夜间的物质。物质的想象控制着夜。正如水是最适合用来混合的实体，夜会深入水里，使湖底失去光泽，会浸润池塘。有时，夜的渗透是如此深入，如此隐秘，以至于在想象中，池塘在白昼依然保留了一点夜间物质，一点实体性的黑暗。

（《水与梦》，137页）

我们接受这个假设：所有的黑色形象都拥有它们各自的特殊性，这个特殊性源自黑概念在想象中的转换，但是这些黑色形象都具有同一个想象元素的性质，即我们称之为“黑暗”的夜晚物质。

由于巴什拉感受到了黑暗元素的丰富和强大，他甚至创立了一个系统研究黑色形象的项目：“如果我们能将所有的黑色形象集中并分类，我们想象可以整理出很好的文学素材……”（《土地与对静息的遐想》，1948年，90页）。他虽然没有完全考虑过将物理学里的黑概念当作遐想的动机，可却注意到了和这些概念相符合的众多黑色形象的特殊性：布满星星的夜空的透明的黑，身体内部的黑，旋涡令人眩晕的黑，炼金术士在黑暗中完成的作品所包含的可变的黑，黑暗中隐藏的神秘的黑。他的这些直觉先于我们的研究，我们发现，在我们始于物理学的遐想和他始于文学素材的遐想之间存在着共鸣。当然，我们不会仅仅局限在这种共鸣中，我们将探索我们的文化带来的所有相关启示。

Part 1



A 黑色的夜空

夜晚，只是对于我们是夜晚，

因为我们的眼睛是黑暗的。

——勒内·巴雅维尔^[4]，《月下的哥伦布》（*Colomb de la lune*）

远离大城市和它的灯光污染，夜晚的天空呈现出深邃的黑色，星星点缀其中。没有人会认为这种说法奇怪：夜晚是黑色的，因为太阳落山了。白天万里无云的天空呈现出蓝色，它的光完全淹没了恒星微弱的光；而到了晚上，地球的大气层便不再呈现这种蓝色。直到发现夜空是黑色的，天文学家约翰尼斯·开普勒（1571—1630）才第一次认识到宇宙学的意义。开普勒支持哥白尼的日心说，和哥白尼一样，他认为宇宙包含了一定数量的恒星。英国天文学家托马斯·迪格斯（1546—1595）也支持哥白尼的理论，但他认为宇宙是无限的，并且恒星是均匀地分布在宇宙中的。开普勒反对这个假设，他说如果是这样，那么亘古以来，宇宙会出现无数颗恒星发射的光芒：我们看到的天空底色应该是无比明亮的！但事实是，我们看到的并非这样，说明宇宙是有限的。

18世纪，英国天文学家埃德蒙·哈雷（1656—1742）和瑞士天文学家让-菲利普·路易斯·德·舍索（1718—1751）的研究使用了一种更为定量的方式来解决这个问题。1720年，哈雷在假设宇宙是无限的并且恒星在宇宙中均匀分布的前提下，计算了这个无限宇宙中所有恒星发出的亮度。为了完成这个计算，他以观察者的位置为圆点，将空间切割成一系列厚度相同的同心圆。他的计算方法是确定每一个同心圆中恒星呈现的亮度，然后将这些亮度相加得出从地球观察到的亮度的总和。如果我们假设每颗恒星的亮度都相同，那么一个圆的亮度就应该是每颗恒星的亮度乘以圆内恒星的数量。如果恒星是均匀分布在宇宙中的，那么圆中恒星的数量会随着这个圆容积的扩大而增多，圆的容

积等于半径的平方乘以固定的圆环厚度。而恒星的亮度会因为它距离的遥远而变得微弱，更确切地说，一颗恒星的亮度会随着这个圆半径平方的增大而减弱。因此，恒星亮度与恒星数量的乘积并不受距离影响：当距离变远，恒星的亮度会减弱，但正是因为距离变远，圆的半径会变大，其中包含的恒星数量也会增加。因此，所有的圆以相同的方式给地球提供光亮，这些光亮的总和是无限的。这就是开普勒天才预设的准确结论。

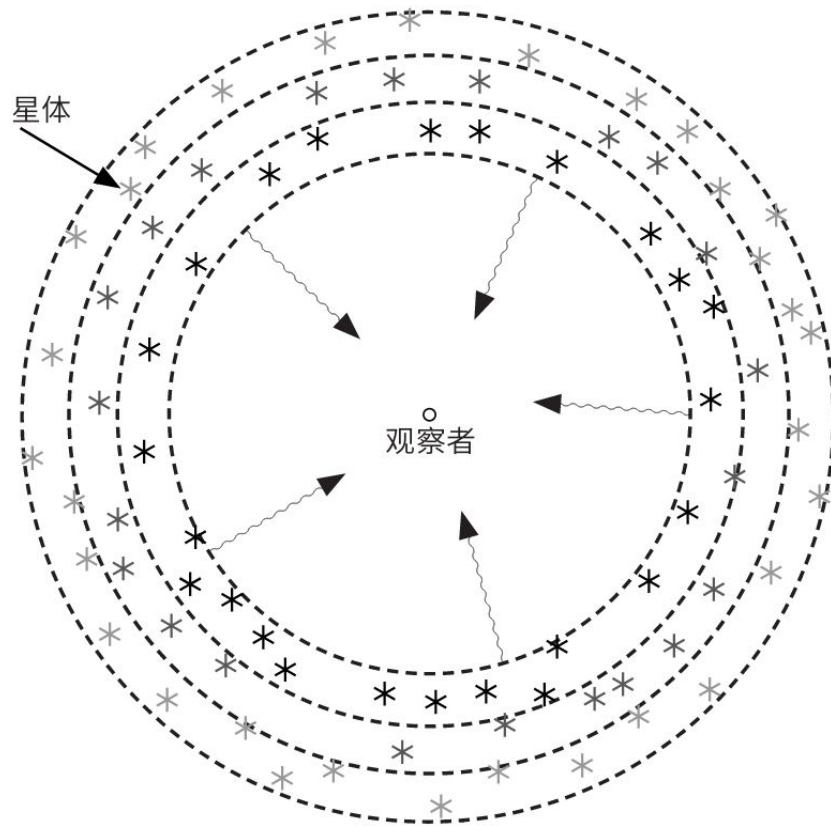


图1.将宇宙切割成相同厚度的同心圆。每一个圆中恒星的数量会随着圆半径的扩大而增长，尽管随着圆半径的增大恒星的亮度会减弱，但是每一个同心圆发出的总亮度是相同的。如果宇宙是无限的，且恒星均匀地分布其中，那么我们头上穹顶的亮度就是无限的。

为了避免这种致盲的亮度，哈雷认为，在真空状态下，恒星呈现出的亮度与它和地球的距离的平方成反比，因此亮度减弱得更快。随着距离的增大，恒星亮度的衰减更大，哈雷得出的这一结论与观察到的结果相符，同时也保留了无限宇宙的猜想。1743年，路易斯·德·舍索通过假想一个由不透明介质构成的宇宙，从物理学的角度解释了这一结论。我们之所以无法看到距离遥远的恒星的光，是因为我们与它之间隔着不透明介质构成的空间，而光被这个介质吸收了。但是一个

世纪之后，英国天文学家约翰·赫歇尔（1792—1871）驳斥了这个论点：星际间的介质吸收了恒星的光，就一定会升温，那么这个介质就会发亮。赫歇尔指出，星际间介质的不透明性如此之弱，以至于天空的背景应该和恒星表面，比如太阳，一样明亮。在这个推理的最后，无限光亮的假想被推翻了，但是在无限宇宙的框架下，夜晚的真实存在依然构成明显的理论矛盾。

1823年，德国医学家、天文学家海因里·奥伯斯（1758—1840）也开始关注夜晚天空的亮度问题。他使用不同的论据，得到了和路易斯·德·舍索相同的结论。在一篇题为“宇宙空间的透明性”的文章中，他写道：“假设在无限宇宙中确实有不只一个太阳存在，并且它们之间的距离几乎相同，或者分布在不同的星系当中，它们的总和是无限的，那么整个天空就应该和太阳一样明亮。设想我们的视线是一条直线，那么从我们的眼睛出发的每一条线都必然会与任何一颗固定的恒星相遇，因此天空中的每一个点都会带给我们恒星的光，也就是太阳的光。”在推理中，奥伯斯强调了一个事实：近地恒星可能会遮住距离遥远的恒星。因此，并不是无数的恒星为夜晚的天空带来光亮，而只是最靠近我们视线的那些。因此，夜空背景的亮度也不是无限的，而是和一颗恒星表面的亮度相同。虽然宇宙是无限的，奥伯斯的论点表明了可见度极限的存在：在这个天际线之上，我们接收不到任何光亮，因为遥远的光源被近地光源遮住了。我们可以和一个在森林里散步的人做类比，森林里的树木也差不多是均匀分布的：无论这个散步的人看向哪个方向，他的视线必然会被树干挡住，无法穿过整片森林。奥伯斯并没有量化这个“障碍物”的距离，即那颗遮挡住我们视线的星球的距离，但是我们可以再次通过将宇宙切分为厚度相同的同心圆的方式，来简单地估算这个距离。我们的视线会接触到一个属于某同心圆的恒星，这个概率等同于这颗恒星的几何截面（圆面面积）与它所属的同心圆的面积之间的比例。考虑到一个同心圆包含的恒星数量，每单位长度的概率等于恒星密度（每单位体积的恒星数量）乘以几何截面的乘积。这个概率的倒数就是我们的视线可以看到的恒星与我们相隔的典型距离。假设恒星的体积和太阳相同，并且它们在空间中分布的密度与可观测到的宇宙中可测物质的平均密度相同。那么这个距离极限大约就是1022光年，虽然很大，但不是无限。最后，宇宙是不是无限的就不重要了，如果它比视线的极限更大，那么天空应该和一颗恒星的表面一样明亮。

这个解法从何而来？令人意外的是，它从诗歌而来！在下一章，文森特将唤起关于夜空的诗意遐想，而在此之前，必须要提到埃德加·爱伦·坡（1809—1849）的作品。1848年，他发表了《尤里卡》，里边有一首讲述他关于宇宙思考的长篇散文诗《关于物质和精神世界的随笔》，在这首诗中，爱伦·坡引用奥伯斯的论点来谈黑色的天空的问题：“如果恒星是连续的无限的，那么天空的背景将会呈现给我们一个不变的明亮，如银河倾泻一般的光亮，只因在这个背景中，没有任何一个点是恒星照耀不到的。”（《尤里卡》，第11章，170—171页）随即，爱伦·坡又给出了结论：“因此，在这种情况下，唯一可以解释我们用望远镜从不同方向只观测到空白的就是，假设这个看不见的背景距离我们异常遥远，以至于那里的光线无法到达我们的眼中。”已知光的传播速度是有限的，确认遥远天体的光亮无法到达我们的视线就是假设它们并不一定是存在的。因此，或许应该将无限的、从任何方向都能看到恒星的宇宙与聚集了光线可以被我们看到、观察到恒星的宇宙区分开来。如果恒星的寿命非常有限，那么布满夜空的发光星体永远无法形成。

在1861年出版的一本书中，德国天文学家约翰·冯·马德勒将爱伦·坡的天才预测形式化了。首先，他重新提及光速的有限性，这是丹麦天文学家奥勒·罗默于1676年在巴黎天文台通过观察木星的卫星运动得出的结论。其次，他认为宇宙的年龄是有限的，就此可得出结论：我们无法看到所有的恒星，只能看到那些与我们的距离低于光在宇宙年龄增长的时间内运动的距离。在那里，会出现一条天际线，天际线以外产生的光都是我们无法看到的。1901年，开尔文勋爵（1824—1907）通过研究恒星发亮的物理学原因估算出了恒星的寿命，从而完成了这一论证。他认为，恒星并不是永恒存在的，也不能永久发光，因为它的能量源是有限的。例如，太阳的唯一能量来源是在自身引力影响下的聚合反应，于是他可以确定跟太阳类似的恒星的寿命：太阳的寿命约是3000万年。但问题是：以查尔斯·达尔文（1809—1882）为代表的地质学家和博物学家测算出地球的寿命要远大于太阳的寿命，这就是一个非常明显的矛盾。为了让太阳能够持续发光，法国物理学家让·佩兰（1870—1942）和英国物理学家亚瑟·爱丁顿（1882—1944）在20世纪20年代初提出了恒星的能量来自原子核的理论。几年之后，德国物理学家汉斯·贝特（1905—2005）发展了这一理论，他描述了在太阳中心发生的热核聚变反应，因为只有太阳中心这一地区的温度和密度足以使反应发生。一颗与太阳体积相同的恒星，其核能量储备足以使它发光近100亿年（体积比太阳大的恒星的寿命比太阳短，

因为它的亮度更高，其消耗核能的速度和它的体积的立方成正比）。我们无法看到距离我们超过100亿光年的恒星，因为它们的光还没有传播到我们这里，这就使我们可以看到的恒星数量明显减少。如开尔文勋爵指出的：“如果广袤宇宙中所有的恒星同时发光.....能够到达地球的光亮也只能是所有恒星光线中非常微小的一部分。”这就可以解决黑暗夜空的问题了吗？是的！原因是，如果我们假设恒星均匀地分布在宇宙中，所有同心圆可以带给夜晚的天空同样的亮度，当观察半径为100亿（ 10^{10} ）光年时，奥伯斯通过因式 $10^{22}/10^{10}=10^{12}$ 计算出的天空的亮度，使得天空由明亮耀眼变成了美丽的黑色。在这一阶段，天空是黑色的，因为我们只能看到离我们足够近的恒星，它们的光传播到我们眼中花费的时间短于它们的寿命。也就是说，由于光速的极限和恒星有限的寿命这两个相互结合的因素，才使我们只能看到无限宇宙的一小部分。一条天际线阻隔了我们对宇宙光线的感知。

膨胀的宇宙

古典物理学的无限和静止宇宙是提出黑色夜空问题的宇宙论前提，这个解释在这个前提下是有效的。但是当今宇宙学模型的背景是膨胀的相对宇宙，在这个框架中，我们的解释依然成立吗？宇宙扩张的第一效应就是会弱化遥远星系的恒星散发的光，实际上就是减少了可直接使用的光源。还要考虑到另一个现象：宇宙的膨胀使来自遥远星系的光线变得发红——这是第二个效应，它是由于光波在膨胀的空间中传播发生扩张导致的。然而，在接收的光子数量相同的情况下，一个天体发出的光线越红，它就显得越昏暗。如果遥远的星系与我们相对静止，那么它们的亮度就相对显得更低。由此得出，距离我们越远的天体，它们的亮度就下降得越快。正因如此，最遥远的星系是很难被观测到的：即便使用最巨大的天文望远镜，对红外光非常敏感的探测器，也需要很长的观察时间来捕捉它们微弱的光。

最后，在目前的宇宙学领域，需要将两个效应结合起来才能解释为什么夜空是黑色的。首先，恒星和聚集了恒星的星系的寿命是有限的，这就限制了宇宙中被发射的光子数量。其次，宇宙的膨胀降低了光子的密度，颜色变红减少了每一个光子的能量。详尽的计算表明，在这两个因素中，第一个因素占主导地位，相对于静态宇宙，宇宙的膨胀最多可以使天空背景的密度降低四分之一。然而值得注意的是，在目前的宇宙学模型背景下，膨胀是加速的，最终星系逃离我们的速度比它们的光传播到我们眼中的速度要快。它们会逐渐离开我们可以观察到的宇宙，然后被我们遗忘。

最古老的光是何时发出的？

黑色夜空的问题让我们开始思考“宇宙视界”的概念。夜晚的天空之所以没有太阳的表面那样明亮，主要是因为宇宙中星体的生命周期有限，我们只能看到其中的极小部分。同样，光速也是有限的，超过宇宙视界这个边界，将不会有任何光传到我们眼中。我们估计，迄今为止可以被观察到的最古老的星系的光，早在太阳和地球形成之前就已经出现了（地球的形成是在45.6亿年前）：它的光偏红的程度说明，它是在132亿年前发出的。

恒星和星系不是宇宙中唯一的光源。如果现在的宇宙是膨胀之后的结构，那么在它的初始阶段，它曾经非常炎热，密度很大，是质子、电子和光子的混合体。光是和物质紧密相关的，自由电子不断发出光，光就会不断地改变方向。一切就像发生在雾中，雾中的水滴会使光线漫射并阻碍光的传播。像在膨胀的气体中一样，宇宙的膨胀会冷却和稀释它包含的物质。在一定的温度下，电子和质子的运动会变得非常微弱，它们相互结合形成了第一批中性氢原子。这个变化彻底改变了宇宙的境况，因为伴随着自由电子的消失，光失去了阻碍，可以自由地以直线形式传播。雾散了，宇宙变得透明起来。

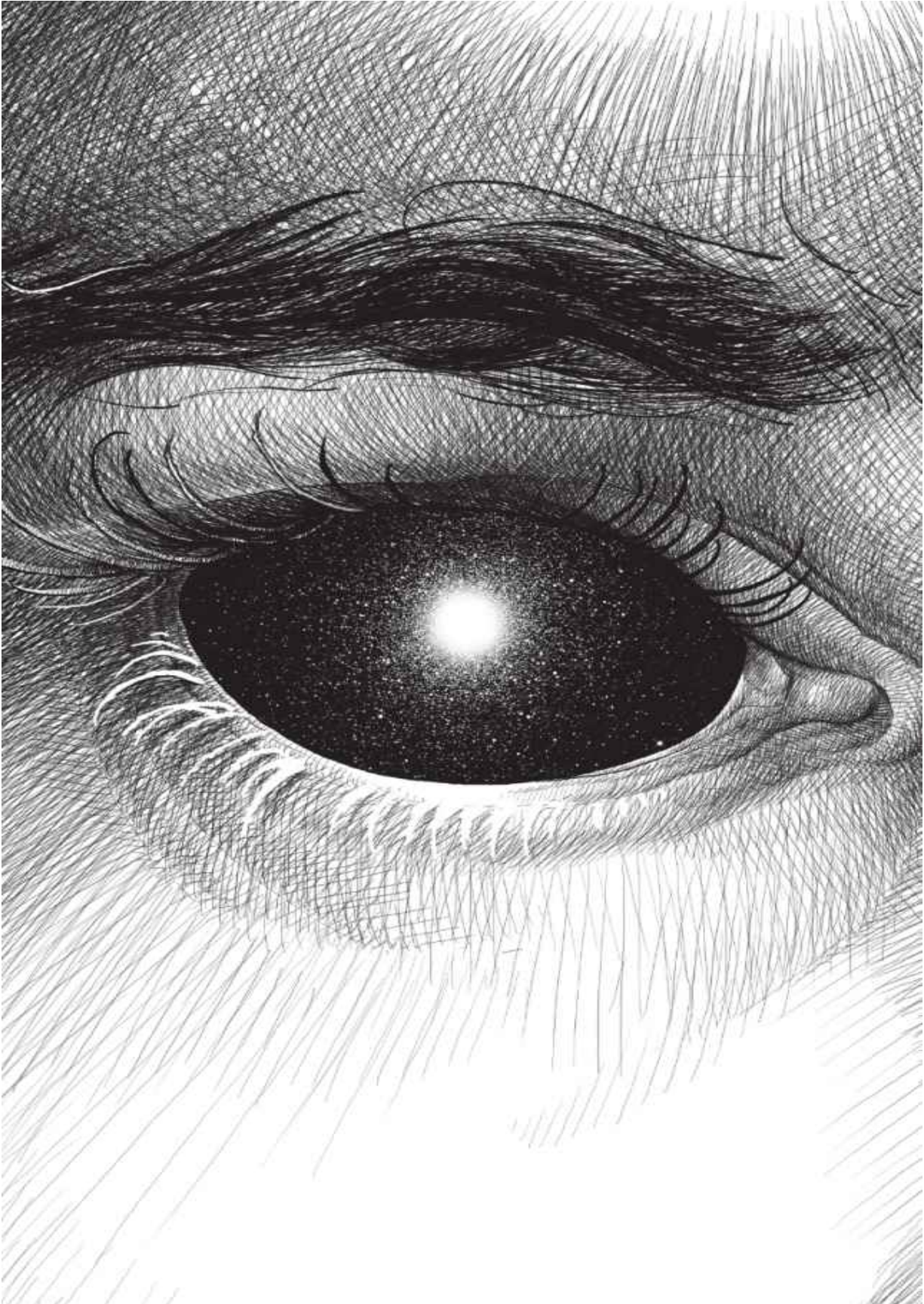
黑夜佯谬具有特殊的重要性，因为光在氢原子形成的时候得到了释放，现在它依然照耀着宇宙。光在一个接近恒星温度的情况下发射出来，为什么我们不能在天空的任何角落都看到它呢？原因非常简单，就是这个原始的光（最初就是可见的光）由于宇宙的膨胀，它的波长增长了。现在它以肉眼看不到的微波形式被人类探测到，这些原始光子的平均能量是可见光能量的千分之一，它们的光通量也比恒星的光通量要弱几千亿倍。这个“化石光线”可以让我们看到宇宙最原始的景象。它似乎是从一个可见的宇宙的边界发出的，一个时空的区域，超出这个区域，任何光线都不能到达我们眼中，因为在此之前物质是黑暗的。我们依然无法了解更加古老的年代，因为有宇宙视界的存在，而根据最近的估计，宇宙视界的光花了近138亿年的时间才传到地球。

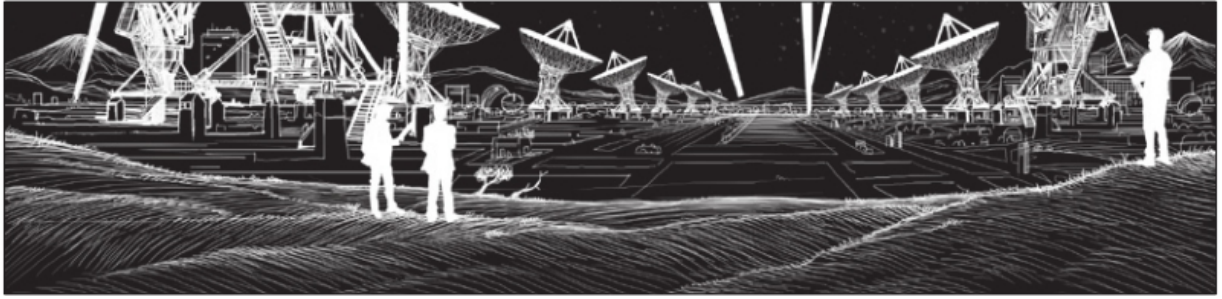
我们能看到宇宙视界之外的地方吗？

既然宇宙视界是由光第一次在宇宙中自由传播的时间限定的，那么我们提出是否能看到宇宙视界之外的地方这个问题似乎自相矛盾了。然而，这还是有可能的。为了做到这一点，我们要丰富我们的研究方法，不仅是对光的研究，还要把注意力集中在最容易消失的粒子和中微子上。要了解化石光线的来源，就要追溯到温度高达几千摄氏度的时代。让我们继续这段在远古的旅程，想象一个温度超过100亿摄氏度的宇宙：在这些极端条件下，任何原子结构或者原子核结构都无法存在。宇宙流体是一个由质子和中子构成的混合物，它包含了大量的电子、正电子、中微子、反中微子和光子。其中中子是很特殊的，它是一个不稳定的粒子，在不到一刻钟的时间里，它就可以通过释放电子和反中微子变成质子。中子之所以不会快速消失，是因为质子在高温中可以发生反向变化，它可以通过吸收反中微子或者电子再变成中子。于是中子和质子的数量达成了平衡。

由于宇宙的膨胀，温度下降了。这个温度不足以维持中子和质子之间的平衡，因为中微子不再和物质产生相互作用：它们开始在等离子区中自由传播，等离子区对于中微子来说变得透明。这个情况和光子遇到的情况完全一样，温度下降到一定程度，氢原子产生，光子自由传播。于是中微子能量分布的形式固定了，它们的温度也随着宇宙的膨胀而下降。一种更为古老的中微子的“化石光线”存在下来，估算其温度为1.95开尔文，它见证了宇宙中充满阻光物质时的环境，也就是位于我们之前确定的光线视界之外的時候。

那么，我们可能观察到这些宇宙中微子吗？很遗憾，答案是否定的，因为它们的能量十分微弱，与宇宙微波背景中的光子能量差不多，而且中微子几乎不与物质发生作用：太阳中心核反应释放出了中微子，需要一个超过1光年厚度的铅板才能阻止它们运动，而太阳中微子的能量是宇宙中微子能量的100亿倍。如果在探测中微子方面没有重大进展，我们就没有机会穿透宇宙视界的屏障。如果没有更好的解决方法，我们只能在脑海中让原始宇宙变得透明。





B 为什么夜空是黑色的

我们用蜡烛点亮世界，

一切显得遥远而阴影重重。

——皮埃尔·勒韦迪^[5]，《星空》（*Ciel étoilé*）

在我们将要研究的所有黑之中，夜空的黑看上去是最不奇怪的。当我的朋友罗兰提到夜空的“黑”时，这个形容词的含义在他的笔下似乎没有经历科学语言的语义变形，所有人马上就能明白它的意思。乍一看，这个黑是普通的。当天文学家思考“天空为什么是黑色的”这个问题时，他参照的是关于夜空思考的普遍体验。

但不得不说，这个黑仍然很特殊。它拥有一段完整的历史，并且毫无疑问，它出现在哲学家、诗人和学者的语言中，这赋予它一个确切却自相矛盾的含义。天文学家不会思考为什么豹子和油橄榄是黑色的，这个黑也不是乌鸦羽毛的颜色，也非来自乌木、煤炭或者黑烟。它和导致黑潮的黑色无关，也和“险恶用心”这个短语中包含的关于“黑”的隐喻无关^[6]。长久以来，关于天空的沉思将“黑”从这些普通的所指实物中提炼出来。黑并不是从地球发出，笼罩在某一个物体上的色调，而是缺少恒星光照的标记。因此，这里说到的黑只指天空的背景以及巨大的宇宙空间。准确地说，它指的是恒星的光线可以穿越的黑暗。因此，天文学家看到的黑是清晰透明的。黑本身是星际真空的一部分，而它却自相矛盾地证明了宇宙空间透明性的存在，因为这个透明使得恒星的光线可以穿越遥远的距离到达地球。

黑通常具有模棱两可的意味，因此它常被用在隐喻当中，而这个透明的黑是清楚而确定的，它同样具备情感上的共鸣。星空的形象——繁星点点的夜晚——是一个无穷大的形象，是诗人无穷无尽的隐喻，是一个引发所有人遐想的景象。

黑色的透明性：半透明介质

天空的黑色是一个自相矛盾的色彩：它既代表颜色的缺失，也代表可以让光线通过的透明性。远古时代，哲学家们就已经认识到这种模糊的透明的特殊性。亚里士多德（公元前384—前322）首先将它命名为“半透明介质”。

亚里士多德在他的作品《论灵魂》中，就视觉这个主题给出了解释，视觉首先是对色彩的感知，而色彩的传播需要依靠一个可以被染色的介质：半透明介质。在这一过程中，半透明介质变得明亮，并且可以传播色彩：“通过半透明物质，加上一个外来色彩的出现，我看到了原本看不到的东西。”（《论灵魂》第二卷，7页）于是我们认为半透明介质是看不到的，事实上，亚里士多德列举了空气和水这样的透明流体的例子。我们感兴趣的点是，他还指出只有被光线激活的半透明介质，被他称为现行的半透明介质，才是透明的（并且会吸收穿过的光线的色彩），而那些潜在的半透明介质，没有色彩出现的，始终是黑暗的：“只是处于潜在状态的半透明介质依然是黑暗的。”（《论灵魂》第二卷，7页）然而，这种关于潜在半透明介质的黑暗性的说法一定源于对夜空的观察，因为亚里士多德也明确指出：“由于火或某种类似火的物质对地球轨道以外的物体产生作用，半透明介质处于完成状态（也就是说它将自己的力量现实化了），可以说，光线就是半透明介质的颜色。”“地球轨道以外的物体”指的就是天体。这就意味着，夜空的黑暗是潜在的半透明介质导致的。黑色的天空是透明的，因为恒星的光可以穿过它。亚里士多德没有将这个黑色与地球物质的黑色混为一谈。我们可以把问题“为什么天空是黑色的”解读为“为什么夜空的半透明性只能是潜在的”，尽管如此，如亚里士多德学派的信徒所说，我们只能冒着不被理解的危险才能获得这样的精确，因为我们讨论的“半透明介质”这个词在现在的语言中，只有形容词“半透明的”这一种意思。

彩色的夜空

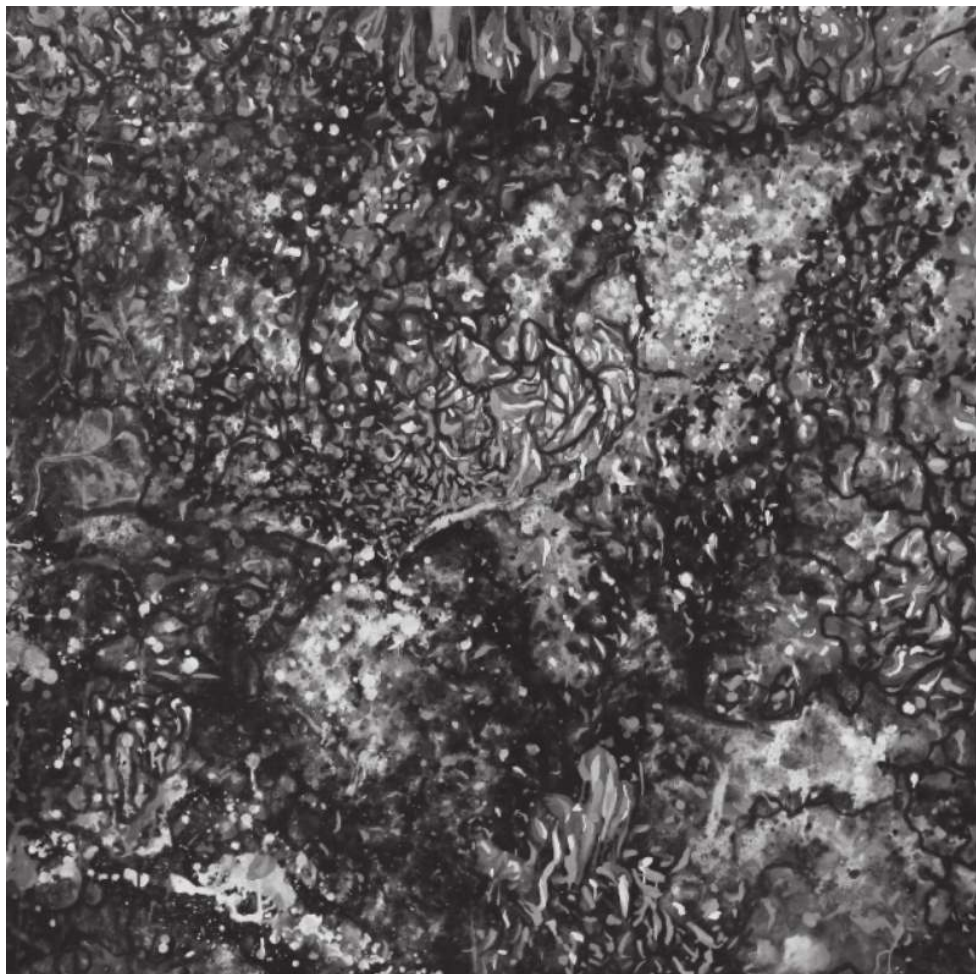
那么，为什么夜空是黑色的？诗人可能会告诉你，夜空在过去并不是黑色的，它曾经是蓝色的。中世纪装饰宗教书籍和文稿的彩图证明了这一点，画家们依然保留着关于“蓝色夜空”的记忆，直到文艺复兴时期，夜空才变成了黑色：“实际上，图像中的夜空通常是蓝色，而不是黑色。中世纪宗教书稿中的彩图和绘画已经说明了这一情况。”（米歇尔·巴斯图罗，《当代色彩辞典》，1992年，135页）事实

上，在黑色独自占领夜空之前，黑色与蓝色有一段很长的共存历史。诗人们依然记得：“我们的头顶上是天空，在它美丽的蓝黑色彩上，点缀着点点繁星。”（查理·费尔迪南·雷默兹、艾美·巴驰，《来自沃州的画家》，1911年，289页）

夜空的模糊色彩和半透明介质一样古老而清晰。从诗歌的角度看，夜空是蓝黑色的，是因为古人只用了—个形容词来描写天空中这两种颜色混合的色调。古希腊人称之为“kuanos”，拉丁人将它翻译为“caeruleus”（天空的颜色），法语中有了“céruléen”这个词，就是“天蓝色”的意思。因此这个首先用来形容夜空的—颜色就此产生，最终半透明介质也失去了最初的黑暗，成为表达白天天空的颜色。然而，关于夜空颜色的讨论并没有结束。艺术家们深知这一点，并在他们的诗歌或绘画中赋予它颜色。阿瑟·兰波^[7]在他美妙的诗歌《醉舟》中赞叹他并未见过的北极光：“我梦见过绿色的夜空，在炫目的白雪中。”之后他又在《彩图集》中描写“十个月的红夜”，很可能参照的就是当太阳永不升起，在天际线出现了恒久的光芒时，从极圈外看到的天空发红的色彩。在夜晚的深处，所有的颜色都可能喷薄而出。

在当代画家中，我最欣赏的是热尔曼·卡米纳德（1973— ），尤其是他的《572星系》，在这部作品中，原始的黑暗中出现了彩色的星云，这些星云交织在一起。面对他的巨幅画作，我们的视线感受到了趋向无限大的相位差：他的画将我们的感觉扩展到了天际。奇怪的力量在气云中发挥着作用，而恒星就在气云中杂乱地产生。通过色彩的层叠和交织，星体之间产生了无法测量的关系，它展现在观察者的眼前，宇宙的狂热景象让观察者目眩。凝视着这些色彩，我仿佛看到了世界的起源，天文望远镜让我们看到了带着“假色彩”的宇宙，看着望远镜里的画面，我惊得目瞪口呆（这些画面是由肉眼无法看到的光线组成的，我们会赋予这些画面—些色彩）。

和天文物理学家—样，卡米纳德用自己想象的工具，在超越普通光谱的频率上探测现实。这些被重新发现的色彩数量巨大，它们在极度黑暗的背景上显得格外突出，其拥有的强大魔力几乎到了可怕的程度……宇宙中—股狂热的力量猛烈地迸发出来，超出了我们承受的基准。银河幕布的美丽激烈地流淌，在超现实主义—者眼中，这美丽抽动着；而在古典主义—者眼中，这美丽是宁静的、悬置的，它强大的力量将我们个人命运中虚幻的躁动化为乌有。“让我们暂时或者永远忘记自我吧，享受真实的光辉”，这是急速增多的星体传递给我们的消息。



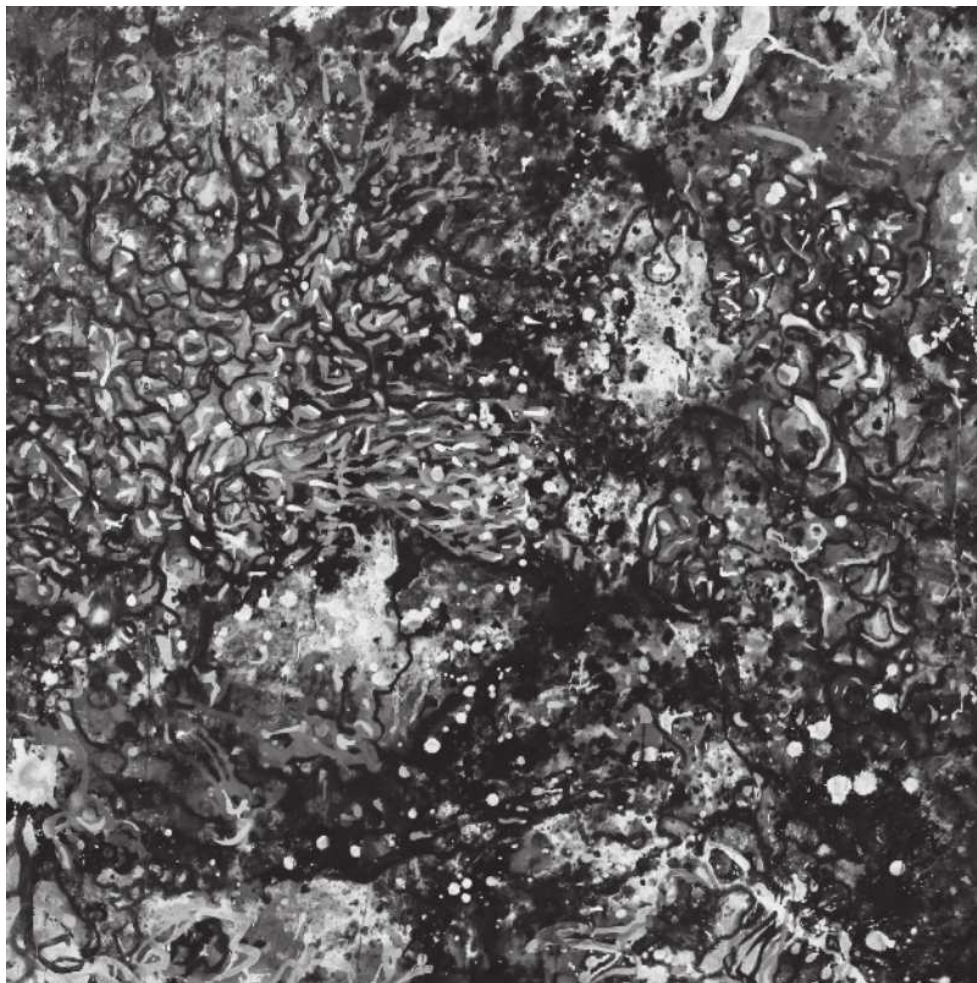


图2.《572星系》，热尔曼·卡米纳德，2011年。2×130×130cm，油画，私人收藏。

星座的黑色盒子

天空的黑色体现了宇宙无法估算的维度，它让我们感受到地球和恒星之间遥远的距离。这个黑色是夜晚高空的颜色，是宇宙背景的半透明色，而不是覆盖在景象上，让人在道路转弯处摔倒的黑暗。当黑色从天空脱落，它便不再那么纯粹，它最终会减弱，被半明半暗的色彩代替，甚至连空中的云也变得非常厚，云层沉沉，密不透光，无法屈从于天空的黑暗。它们使这黑暗模糊不清，使天文学家无法观察到恒星，使完美的黑色蜕变为简单的暗淡：

一阵风从漆黑的天空降临，像是在原始的混乱中，用一种不为人知、无法名状的材料制作的稠密厚重物搅动起悲哀的波浪，最终露出

梦魇般的沉重灰色云层，在整个风景区上方飘浮着。（朱利安·格拉克，《阿尔戈古堡》，1938年，146页）

说到底，只有辽阔的海洋能够汇集夜晚很大一部分的黑暗，而不将这黑暗表现出来。孤独的水手在大海上可以看到反射在海浪上的星座随波荡漾，而这始终是真实光线的反射。

巴什拉在他的著作《空气与梦幻》中，书写了关于星座的诗。他在诗中解释道，只有幻想可以赋予星座生命，因为古代的天文学家将这些发光的点连在一起，勾勒出一些神话人物的轮廓，而事实上，这些发光的点没有任何关联：

在蔚蓝的夜晚这个巨幅图画上，数学家用他们的遐想描绘出图样。星座都是假的，都是美妙的错误！星座将这些完全互不相干的星体连接在同一个图像中。在这些真实的点之间，这些如同孤独的钻石一般的星体之间，关于星座的遐想画出了想象的线条。（巴什拉，《空气与梦幻》，202页）

在恒星和更为遥远的星系之间没有真实的联系。需要多情的遐想才能将空间弥合，让星座穿过无边的黑暗描绘在夜空中。巴什拉想象了一个浪漫的场景来描绘它——一个牧羊人和他的伴侣一起欣赏着夜晚的奇观：

年轻的牧羊人啊，你在梦中用手轻抚的白羊，就在天上呢，它正在无边的夜晚里轻轻地转着！你明天能再看到它吗？把它指给你的女伴看看。你们两个开始画吧，这样就可以认出它，熟悉它。你们两个要相互证明你们看到的是相同的画面，有着相同的向往，你们在同一个夜晚，同样的夜的寂静中，看到了同样的幽灵经过。当梦与梦结合时，生活将变得如此丰富。（巴什拉，《空气与梦幻》，203页）

然而夜晚的画面，与所有伟大的画面一样，都可能被颠覆。黑色是多情梦想的庇护者，但也是深度焦虑的埋伏者。黑色的夜晚是双重性的，它可以转换成自己的对立面，它既残忍又温柔，时而危险又时而欢快，它可以是闪光梦境的温柔的孕育者，也可以是难以名状的阴森噩梦的制造者。

黑的选择

这个双重性首先关系到梦想的夜晚。为了欣赏真实夜晚的黑，发现它准确的明暗变化，需要在晴朗的天气下，远离城市，抬眼望向这深不可测的天空，这骇人的夜晚，让自己随着它慢慢飘移。有一个著名的佯谬：为了感受黑色的夜晚，需要度过一个不眠之夜，不睡觉，一边凝视天空，一边思考。虽然黑无法从实体上获得无穷的结构，但是它既非中性，也不贫瘠，它无法被我们全然认知。夜晚不可避免地提醒我们意识到个人生命的微不足道。它的黑暗可怕而强烈，如同“缺失”一般。

这个可怕的黑暗侵袭着我们，有时像布莱兹·帕斯卡^[8]一样带给我们恐惧，很明显，这是光的缺失，也是爱的缺失。夜晚的天空充满了孤独。没有月亮的夜晚，孤独的重量变得不可承受。在漆黑的夜里，孤独成为绝对，黑暗让人窒息，每一颗恒星都被孤立。它们不计其数，却也成为枉然，它们都是孤独的。面对漆黑的夜晚，就像是面对死亡的画面，体会失去亲人的悲伤。很多诗人将夜晚的黑暗与寂静、寒冷、空虚和其他关于缺失的隐喻做类比。维克多·雨果（1802—1885）描写过对无尽黑夜的极度不安：“他们在哪儿，那些沉没在黑夜里的水手？”（维克多·雨果，《诺克斯海》，1836年）反之，如果月亮在，守护着我们的梦，黑暗会将我们带入一种相较明媚的忧伤中，仿佛它只是一个梦想的盒子，而夜晚是柔和的梦编织成的布。月光是微弱的太阳反射光，它改变了黑暗，而恒星的光却让这黑暗更加强烈。

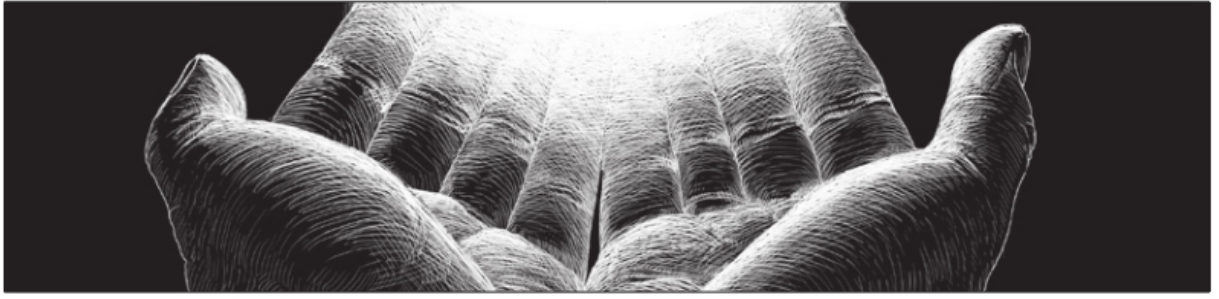
最终，夜空的黑暗稍微缓和了一些：银河的薄纱横贯苍穹。埃拉托斯特尼^[9]说，赫尔墨斯让赫拉克勒斯吮吸赫拉的乳房，这样赫拉克勒斯就可以不死不灭，但是，当赫拉女神发觉后，她拒绝了赫拉克勒斯这个宙斯的私生子，剩余的乳汁从她的嘴里流了出来。后来，其他的神话里讲到，最后赫拉和赫拉克勒斯和解了，赫拉也接受了他。对于天文学家来说，这个乳白色的圆圈勾勒出银河的地图；对于博学的诗人来说，它构成的是一个承诺：具有母性温柔的女神没有完全背弃对无尽的黑暗空间的承诺。

最后，正在思考的人感受到，有一类懦夫在逃避着彻底的黑暗。如雨果所写：“不思考的人生活在盲目中。思考的人活在黑暗里。我们只有黑的选择。”（《威廉·莎士比亚》，第五卷）从某种意义上来说，夜晚必须是黑色的。只有这样，才能在黑暗的最深处安放焦虑或恐惧、平静和冥想，从而忘记每天的烦恼。我们几乎可以从中预言一种道德的必要性。当我们置身黑暗，夜晚让我们不好的一面展现出来，它将我们交付给此刻，让每个人意识到自己是孤独的，让每个人判断自己的行为，发现自己存在的意义：伊曼努尔·康德（1724—1804）在他的《实践理性批判》（1788）中写道：“有两件事让我充满了赞赏和敬佩之情：我头顶的星空和我心中的道德规则。”《实践理性批判》这本书是道德哲学著作的里程碑之一。黑色的天空提醒着我们死亡的不可抗性，它告诉我们如何让生命像恒星一样发光，就是通过自由赋予我们脆弱的生命以意义。如果夜晚没有那么黑暗，我们就失去了一种充满魅力的、深刻的、情感上无法估量的美学体验，也失去了一种基本的存在感。

对于“夜空为什么是黑色的”这个问题，哲学家以一种目的论的方式来回答：“天空是黑色的，是为了让我们看到星星。”这个回答让天文物理学家感到可笑，只能说这样的答案是目的论，属于道德领域。即使黑色的天空让人不安，这种不安也是从属于自我意识的，是一种自由，当世界上所有事情变得不可控甚至让人绝望时，这种关于自由的确定，是我们即使独自面对黑暗也能感受到的极大安慰。这让我们想到一位伟大的思想家在被刺杀之前不久所说过的话：

这个国家病了。暴力摧毁着我们的土地，到处都是混乱，人们陷入困惑。可我确定地知道，只有在漆黑的夜晚，我们才能看到星辰。（马丁·路德·金，《我已达至峰顶》，1968年）

Part 2



A 黑体

看到外面一片漆黑，我们大可不必成为一道光。

——菲利普·葛洛克^[10]，《猫的未来》（*L'avenir du Chat*）

19世纪末，英国物理学家威廉·汤姆森，也就是著名的开尔文勋爵，认为物理学不会再有什么新发现了，只有两片云遮挡着物理学的天空，其中一朵涉及热物质发出光线的光谱问题。学者们完成了这一现象的数学模式，与低频光的实验曲线合理地一致，接近红光和红外线。而对于高频光（蓝光和紫光）的实验则和该模式出现了严重出入，实验得出的数值比预期的要低得多。事实上，这个问题是真正掀起飓风的根源，因为解答这个问题的必要理论和实验发展促生了量子理论。

让我们从头讲起，故事发生在19世纪末的柏林。这个新帝国的首都接待了一些世界顶级的实验物理学家和理论物理学家。物理学的发展似乎达到了顶峰，当时的物理学有三个基础支柱：力学，包括艾萨克·牛顿（1642—1727）提出的引力学说；以詹姆斯·克拉克·麦克斯韦（1831—1879）为主提出的电磁理论；热力学，探讨能量的不同形式以及这些形式交流和转换的方式。在法国物理学家萨迪·卡诺和英国物理学家们关于蒸汽机研究的推动下，热力学得以产生。它建立在两个原则上：

——能量的储存。根据这一原则得出，一个封闭系统内部能量的变化和对外交换的热和功的量是相等的。

——熵的增加。它解释了为什么热量总是从一个热物质向冷物质流动，而不会出现反向流动。

热力学这个学科分为两个分支。第一个是“现象学”热力学，它主要对产热现象进行宏观描述，而不对它们的属性或微观原因做出判断。第二个是统计热力学，它是在奥地利物理学家路德维希·玻尔兹曼（1844—1906）的推动下产生的，这个分支从对一个物质的微观描述出发，通过假设分子或原子的存在（当时分子和原子是同一概念），来理解热的转化。

这一领域的物理学家们关注的一个问题是发热物体所释放的辐射，它会随着温度的升高改变颜色，开始是淡红色，然后变成鲜红色，最后变白，其目的是从发出这一辐射的物质属性出发，详细解释辐射的特征。1859年，德国物理学家古斯塔夫·基尔霍夫（1824—1887）通过将热力学第二定律应用在一个热平衡的物体上，就这一主题发表了第一个重要结论。他证明了物体发射率（物体在一定温度下辐射的能量与同一温度下黑体辐射能量之比）与吸收比（被物体吸收的热辐射能与投射到物体上的总热辐射能之比）之间的联系具有普遍的规律：它不受物体的束缚，只和物体的温度有关。这个普遍性赋予了基尔霍夫理论一个根本意义。实际上，这个普遍性意味着一个能够大量吸收一定频率光线的物体也是在这个频率上很好的发射物体，反之亦然。这导致“黑体”概念的产生。基尔霍夫于1862年创造的黑体是一个能够吸收所有光能的理想物体。为了保持平衡，它会辐射出完全等量的光能。黑体提供了物质辐射的理想标准，这些物质或多或少是黑色的，但都不是绝对的黑。

1879年，奥匈帝国（所属的斯洛文尼亚）物理学家约瑟夫·斯特凡（1835—1893）得出了第二个重要的结论。他通过实验确定了黑体每单位面积发出的光通量与其温度的4次方成正比。正是鉴于这一规律，他通过将太阳总辐射量及其假定的表面积相关联，最终确定了太阳的温度（约5500摄氏度）。因为，太阳是一个黑体，虽然这好像和形容词“黑”的普通含义完全不符。正如文森特所说，将太阳与黑体等同是一个极具干扰性的矛盾，因为在人类的想象中，星体的光辉和灰烬、烟灰是完全相反的，但这也是产生巨大矛盾的根源。

黑体之谜

当时，最真实地重现黑体特点的方式是在炉壁上凿一个非常小的洞。从这个洞口射入的辐射光会承受炉内壁的众多漫反射，进去的光线最后在烤炉中被吸收，永远无法放射出去。这个洞和黑体一样具有完全的吸收性。另外，炉内壁在原子的热激发效应下，发射出全频辐射。物理学家们研究了从洞中透出的光线，它是由放射和吸收之间的热平衡产生的。德国物理学家威廉·维恩（1864—1928）通过同样的烤炉实验，根据温度确定了光谱的形式。1893年，维恩迎来了决定性的阶段，他从纯热力学的论据出发，根据光频（ ν ）和物体温度（ T ）计算出黑体光谱的普遍形式。这个光谱形式必须是 $u(\nu, T) = \nu^3 F(\nu/T)$ ，其中 F 是未知函数，只取决于光频与温度之间的关系。在固定温度条件下，将所有频次的基值相加，维恩的公式就可以证明斯特凡的定律从理论上讲是合理的。1896年，维恩又提出了一个特别的函数 F ，它可以导致一个与高频标准相符的频谱： $u(\nu, T) = a(\nu/c)^3 / \exp(b\nu/T)$ ，其中 a 和 b 是实验中确定的衡量， c 是光速。

维恩的一个好朋友，德国物理学家马克斯·普朗克（1858—1947），从1894年起也对黑体问题产生了兴趣，而他的目的有些不同。普朗克对热力学的第二原则非常着迷，他的博士论文就以此为主题，此外，他不承认玻尔兹曼关于原子的假设。通过研究黑体，他希望可以重新认识热力学的不可逆性，而这个不可逆性并不建立在这个假设上。他设想这个不可逆性和物质与辐射之间的互动相关，当时这个互动被假设为连续的，而玻尔兹曼认为这个不可逆性和微观统计效应相关。

从1895年起，普朗克就有了一个想法，将一组理想的共振器（振荡器）放置在具有完全反射内壁的空洞中，这组共振器就可以描述黑体。这些共振器是在电磁场效应下振荡的电偶极子。根据基尔霍夫的结论，由这些共振器发射和扩散的辐射的最终光谱可以让我们发现黑体定律。普朗克选择了这个模式，因为一个共振器导致的电磁波扩散是一个不可逆的过程，哪怕这个共振器是完美的，没有任何的摩擦或阻力。玻尔兹曼批评了这个模式，因为麦克斯韦的电磁公式在时间逆转的情况下是不变的。这些公式在时间上是可逆的，因此它们不会导致不可逆性的出现。两位学者发生了争论，普朗克最后承认玻尔兹曼

是对的。玻尔兹曼也提出了一个建设性的意见：为了获得一个不可逆的性能，实验的进行应该像示范包含无序分子的气体演变的不可逆性一样。这就等于给普朗克的模式中加入共振器不规则运动的假设。

普朗克不认为电磁场是导致不可逆性的可能性来源，他将精力放在了热力学上。为了揭示物理学定律的真正原因，维恩的经验公式是不够的。普朗克希望只使用基本原理就可以确定黑体的光谱。他创造了一个新的模式，在这个模式中，电磁辐射的振动和共振器的振动是互不关联的。他从中得出两个结论：在大范围内，系统的演变是不可逆的；辐射最终会变成同质的和各向同性的。他取得了一定进展，却没有达到一个令人满意的模式。

这就是在1900年之前的研究状况，在这一年有两组实验人员研究了在低频转速中的黑体光谱性能。他们得到了相同的结论：在这个频率范围内，维恩的公式是完全错误的，它没有考虑到实验数据。

1900年10月7日，德国物理学家、夏洛特堡帝国理工学院的实验员海因里希·鲁本斯（1865—1922），在普朗克位于柏林郊区的别墅里拜访了他。两位物理学家很自然地谈到了黑体问题，鲁本斯给普朗克描述了他测量红外光谱的末端方面的最新进展：在这一阶段，能量的密度和温度成正比。在鲁本斯离开后，普朗克马上开始工作，第二天，他寄给鲁本斯一张明信片，向他建议了一个关于黑体光谱的新公式： $u(\nu, T) = a(\nu/c)^3 / [\exp(b\nu/T) - 1]$ 。这个公式遵守在低频辐射中（在红外线中）能量和温度的比例限制，又与关于高频辐射的维恩公式相结合。当晚，鲁本斯和他的同事费尔迪南·库尔鲍姆（1857—1927）又做了一些测定，发现它们在所有频次上都和普朗克的新公式完全相符。几天后，10月19日，普朗克在柏林将这个算法介绍给德国物理学会的同事们。

普朗克如此迅速地获得这个算法，并非偶然，也非灵光一现。在他之前发表的文章中，他就已经得到了几乎所有的数学方法和概念。至于他的新公式，他只是在维恩公式和另一个英国物理学家瑞利男爵约翰·威廉·斯特拉特（1842—1919）的公式之间做了一个插入法。

1900年6月，瑞利男爵提出低频光谱的公式： $u(\nu, T) = 8\pi(\nu^2/c^3)kT$ 。然而瑞利男爵的公式也遇到了物理学中反复出现的问题：将所有频次的基值相加，会得到一个无限的总能量。1911年，奥地利物理学家保罗·埃伦费斯特称这个结论为“紫外线灾难”。普朗克在自己的介绍中，完全

没有提到这个不足之处，也没有提到瑞利男爵的结论，因为他不接受原子论假设。可是，普朗克对这个结果并不满意，因为他总想从最初的理论推导出它来。1920年，他在颁发诺贝尔物理学奖的演讲中解释道：“即使辐射的公式被证明是完全正确的，它也只能是通过幸运的臆想得出的插值公式，这无法让我满意。从发现这个公式起，我就竭力给它一个真正的物理学的解释，这让我跟随玻尔兹曼的观点，思考概率与熵值之间的关系。”

为了获得他所希望的更为基本的理由，普朗克别无他法，只能借助于玻尔兹曼的统计法，虽然他始终反对原子论假设。他引入了一个理念：共振器的总能量被平分为能量 ε ，这个能量与它的频次 ν 成正比（ $\varepsilon=h\nu$ ）。所以，尽管共振器和辐射拥有持续变化的能量，但它们之间的交换是通过小量化包完成的。在这个公式中，比例因数 h 是物理学中一个新的常量，它不是被立即当作基础常量的。事实上，普朗克明确拒绝和玻尔兹曼一样以现实的方式来解释这个常量，而玻尔兹曼在假设原子存在的前提下，证明了常量 k 。尽管如此，在“绝望的行动”中，（普朗克说：“因为我有意识地远离了原始状态。”）他引入了与能量和频次相关的常量并称它为“ h ”，它是“hilfe”（德语里“救命”的意思）的首字母。这让他可以验证自己的公式，并确定了凭经验引入的常量的值： $a=8\pi h$ 和 $b=h/k$ 。他得到了如下光谱：

$u(\nu, T) = 8\pi h(\nu/c)^3 / [\exp(h\nu/kT) - 1]$ 。几周之后，1900年12月14日，普朗克将这个公式呈交给柏林学院。对比普朗克提出的第一个公式，我们会认为他所做的只是一个简单的符号性变化，而事实上，这是一个真正的概念性跳跃。

常量 h 很快就成了量子物理学的象征，普朗克的研究也促进了量子物理学的发展。1905年，年轻的阿尔伯特·爱因斯坦（1879—1955）撰写了好几篇具有革命性的文章。他的第一篇文章，可以说比普朗克自己都更为认真地研究了普朗克的理论。爱因斯坦认为，光不是一个连续的现象，而是由各种能量粒子传递的，这些能量粒子后来被命名为“光子”。这使他可以合理地解释海因里希·赫兹（1857—1894）于1887年发现的光电效应。因此在一定环境中，光是一个微粒的结构，而不是波状的结构，从这个意义上讲，光是由一些不可分解的小团组成，这些小团携带的能量与频次相关。这一发现，以及证明原子存在的实验，是20世纪初量子革命的开端。

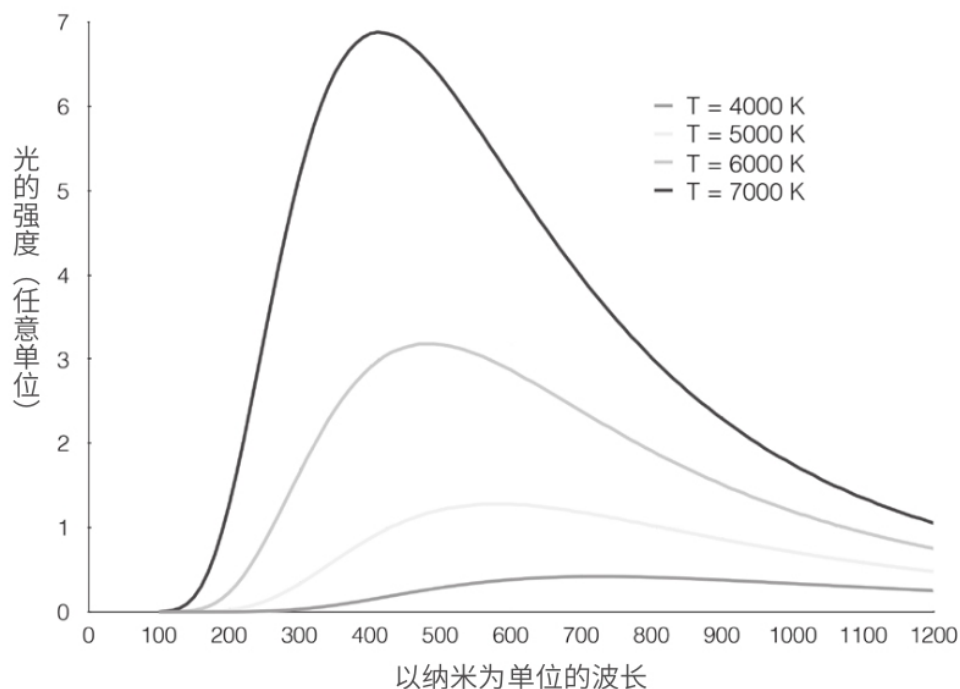


图3.黑体光谱的形状仅取决于光源的温度。当温度增高，曲线下的面积增大，曲线的最大值向短波方向移动。

因此，解决黑体辐射之谜的方法是一场颠覆几近完美的古典物理学的冒险，而走向了令人惊讶的、意想不到的量子世界。开尔文勋爵认为，这只是一朵很快会被吹散的云彩。普朗克认为，这是一种痴迷，会使他违背自己的信念。爱因斯坦认为，这是用来发现关于光这个最有趣现象的工具，是粒子和波的概念的融合。

黑体是真实存在的吗？

计量学需要一些能够尽可能完全模拟理想黑体发射的设备，理想黑体的发射率要接近1。超黑就是这样一种材料，它是通过化学侵蚀镍磷合金的表面而制成的，并且只能反射0.4%的入射光。另一种解决方案是将碳纳米管垂直排列在硅表面：合成材料可以吸收99%的入射光，从紫外线到红外线。最终萨利纳米系统公司将纳米碳管黑体投入市场，这是一种能够吸收99.8%的入射光的可喷涂颜料。英国艺术家安尼什·卡珀尔（1954— ）是唯一将这种涂料应用在艺术作品中的

人。

正如我们关于太阳所说的，一些恒星光谱的连续部分和黑体的光谱几乎一致。然而，在恒星内部产生的放射和吸收的组合作用会在物体表面放射的光谱中，以第一近似的方式，强加一个与不同内部层级关联的黑体的组合。因为较深层级的温度更高，所以它们比较浅层级发出的光更多，但是也被吸收得更多。也正因如此，每个层级的光谱必须乘以吸收率这个权数。所观测到的光谱是所有基值的总和，因此没有任何先验的论据可以证明它和一个黑体光谱是相似的。但是对于太阳来说，我们接收辐射的区域厚度约为500千米，远小于太阳半径（约696000千米）。因此这个光圈的温度相对均匀，这使得黑体光谱和太阳光谱有充分的近似性。于是，我们将一颗恒星的有效温度定义为一个黑体辐射出与恒星等量能量时的温度。那么，太阳的有效温度就是5770开尔文，即5500摄氏度。

最冷的黑体

20世纪60年代中期，两位美国无线电天文学者阿诺·彭齐亚斯（1933— ）和罗伯特·威尔逊（1936— ）发现了一道仿佛来自天空各个方向的辐射。令他们惊讶的是，这道辐射的存在是1948年俄裔美国物理学家乔治·伽莫夫（1904—1968）所预言过的。考虑到宇宙的扩张，伽莫夫猜测这道辐射一定是在一个比现在密度更大、温度更高的阶段出现的。如果过去宇宙的温度已经达到几千开尔文，那么这个物质就完全被电离了，而光则随即在自由电子上扩散。那时光的传播不是直线形的，而是曲折的。和降压膨胀的气体一样，宇宙的扩张会稀释和冷却宇宙中的物质。当温度降至3000开尔文以下，电子就可以和质子结合，形成第一批中性氢原子。那时宇宙已经存在了38万年。在那一刻，光可以以直线的形式，在变成透明的宇宙里自由传播。通过这样的设想，伽莫夫预测，在宇宙变透明时占据优势的辐射，如今依然充斥在宇宙中。然而，由于宇宙的膨胀、稀释和冷却，这道辐射的能量已经比起初衰弱了。彭齐亚斯和威尔逊发现的这道辐射轻松地证明了这一点，这一发现也让他们获得了诺贝尔物理学奖，因为这一发现有力地证明了宇宙扩张学说。这道原始辐射是由一个温度约为3000开尔文的物体发出的，现在可以通过温度仅为2725开尔文的微波形式感知。它被称为“宇宙微波背景辐射”，几乎和我们的宇宙同样古老，它为我们描绘了宇宙在中性氢原子形成时的化石图景。1992年，COBE卫星（宇宙背景探测者）对宇宙微波背景辐射进行了第一次精确观测，WMAP（威尔金森微波各向异性探测器）和“普朗克”探测器也分别于2005年和2013年对这道辐射进行了观测。这道辐射的光谱几乎和黑体的光谱完全吻合，最大偏差仅为0.005%。根据定义，这使得宇宙微波背景成为被观测到的最完美和最大的黑体，并且极有可能是最冷的一个。

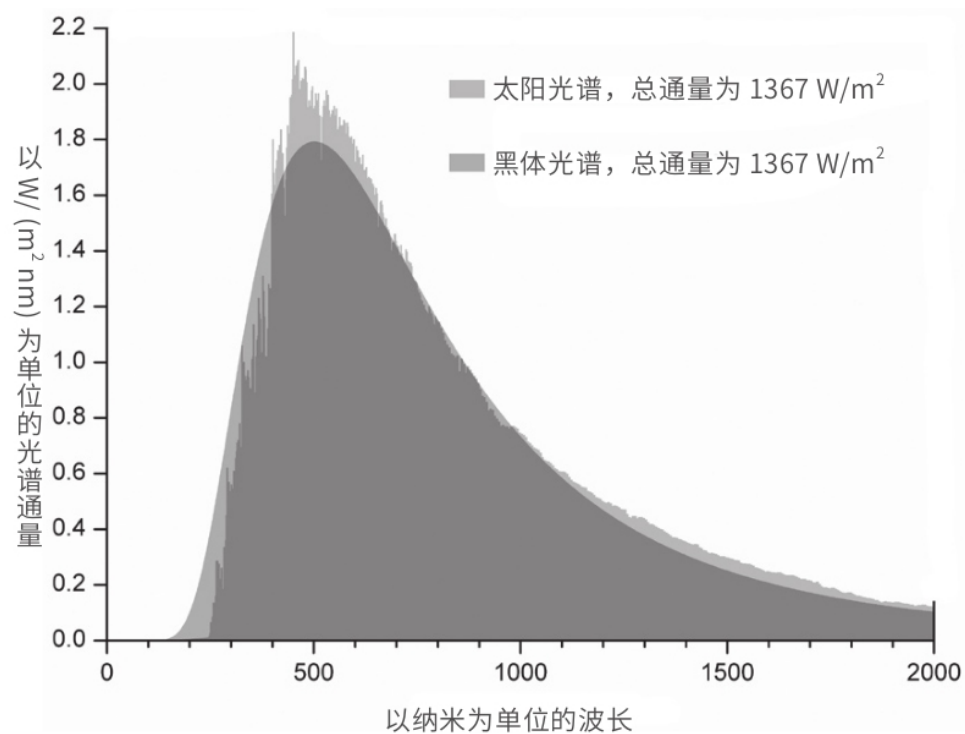


图4.太阳光谱与温度为5770开尔文的黑体的光谱非常近似。

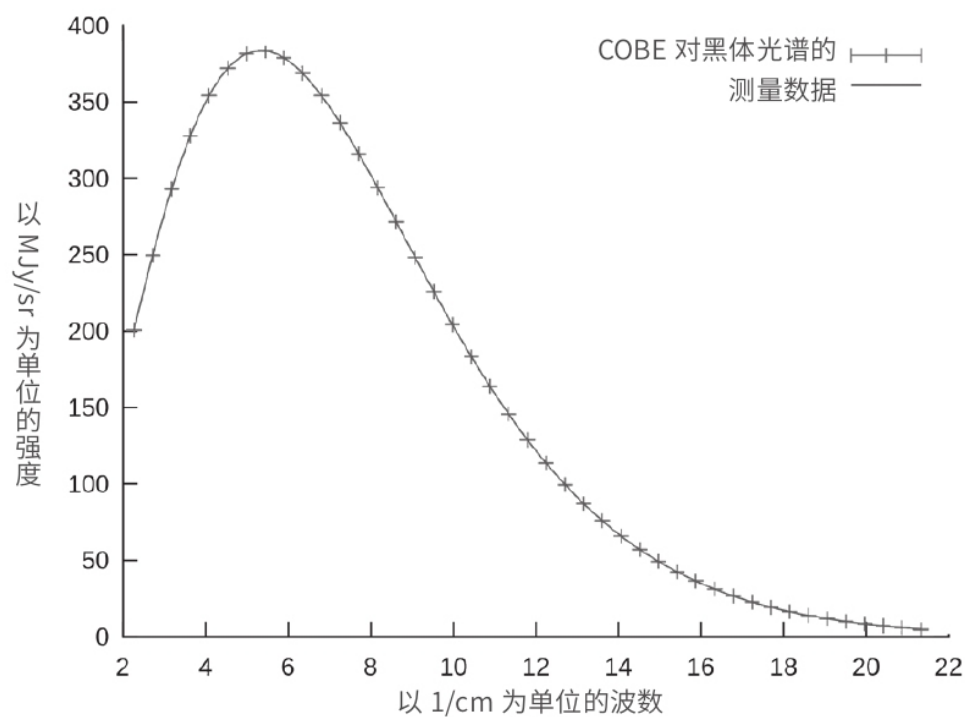
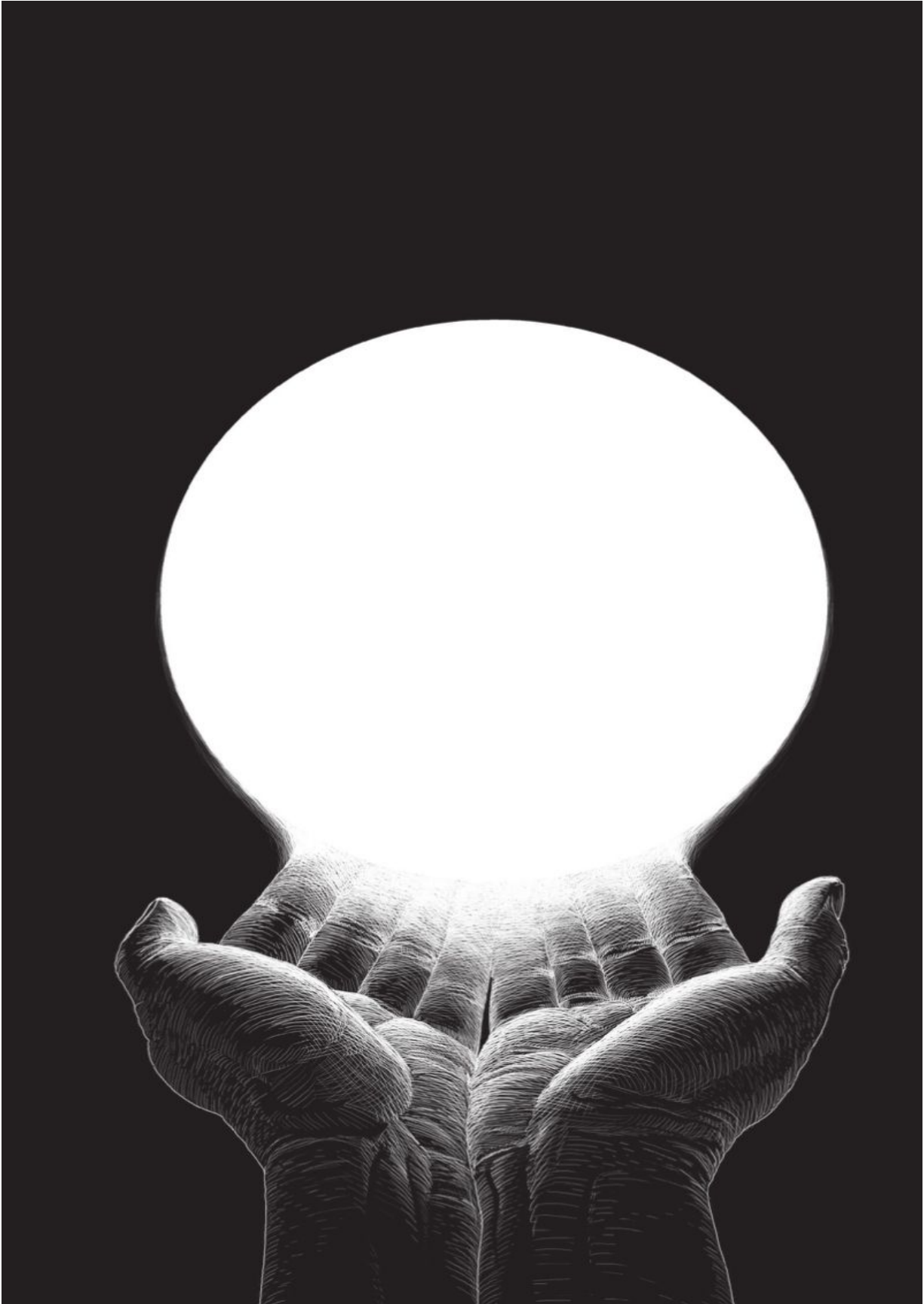


图5.COBE卫星于1992年获得的宇宙微波背景辐射的光谱。这个光谱和温度为2725开尔文的黑体光谱几乎一致。





B 黑体辐射

不再需要任何颜色，我只想将它染黑。

——滚石乐队^[11]，《将它染黑》（*Paint it black*）

在“黑体”这个科学表达中，形容词“黑”的含义似乎并不成问题：难道它不单纯指物体的颜色吗？实际上，这个黑暗只是用黑色来做个类比。一个物体的颜色是与其表面反射或扩散的波长相符的（颜色也可能与物体的微观结构有关），而光的其他成分则被吸收了。一个白色的物体是反射了所有可见光的波长，而一个黑色的物体则是将这些波长全部吸收了。因此在太阳光下，一个黑色的物体比白色的物体更容易吸收热量。但是这个著名的特性与物理学家所说的黑体特性之间存在着巨大差异。物理学家称之为“黑体”，是因为它会吸收电磁光谱的所有光频，而不仅仅是彩虹上颜色的光频：黑体吸收了整个光谱，其中包括肉眼看不到的紫外线、微波等光频。黑体是完全吸收剂。它的黑暗不再是表面的、根据光照而改变的色调，而是它的本质属性、它的定义所在。这个黑暗中还要加入黑体的另一个特点：为了保持平衡，黑体必须以辐射的形式将它所吸收的光频释放出来。

黑体不再属于有色物体构成的经验论世界，而属于物理理论知识：它是一个近似真实物体特性的模型，而这些真实物体通常是灰色的，也就是说，它们会反射一部分吸收的电磁波。黑体是一种理想物质，它的黑暗是非同寻常的。物理学家创造了一个新词来准确地形容它：**blackbody**。这个词通过将形容词（**black**）和名词（**body**）相结合，把它们从普通语言中剥离出来。我们的语言并不完全适合描述这个事物（或许可以将它翻译为“**corps-noir**”），除非需要突破普通语言的限制。为了探索这个从黑中想象出的事物，仅仅靠编制直观的隐喻是不够的。我们不应该止步于这种简单的一语双关：我们所说的黑色不是表象的黑。巴什拉对于黑体客观认知的精神分析需要深入研究黑

体的物理学特性，也就是它的完全吸收能力和它的辐射的物理学特性。

如罗兰之前提到的，关于黑体的一个比较好的实现就是一个烤炉，从壁上凿一个可以吸收光的小洞。第一部《法兰西学院辞典》（1694）中就有了这个习语：“烤炉中是黑色的。”它指的是内壁覆盖着烟灰的烤炉的黑色，而这与一个关于黑体的相对准确的直觉相一致。烤炉开口内的空荡是将黑体现实化的一个比较完美的方式，但这只是一个近似性的方式，甚至在某些地方会出现错误的图像，如何通过内壁覆盖着烟灰的烤炉的图像来理解太阳是一个黑体呢？烤炉和太阳的对比，就像是轻轻的灰烬和厚厚的岩浆之间的对比、普通感官和科学思维之间的对比。太阳可以吸收所有辐射并把辐射以热能的形式释放出来。太阳不是黑色的，却是一个黑体。这就是一个普通感官和理性思维之间出现失调的典型例子。

然而，我们确切地知道，当烤炉不是静止的（黑暗的），而是处于开启和运转状态（明亮的）时，我们无法辨识出烤炉里的东西，“和在烤炉中一样黑”这个习语变得很恰当，甚至完全正确。不仅烤炉的亮度让人目眩，烤炉中的物体也像黑体一样运动，也就是说，烤炉的内部会将光线全部吸收和释放，以至于我们无法辨识里面的东西。让·佩兰在他那本有预见力的书《原子》（1913）中是这样解释的：

如果我们从洞口处向里面看，我们在内壁上辨识不出任何细节，我们只能感受到一个光的旋涡，除此我们什么都看不到。假如我们通过一个炽热的熔炉上的小孔来观察里面正在熔化的金属，我们不可能看到熔液的水平面。这说明，不只是在低温下，我们无法辨识烤炉中的物体。（《原子》，151页）

因此，黑体不再是一个漆黑的缝隙，而是一个光明的使人目眩的深渊，一个“光的旋涡”。然而在任何情况中，黑体都会吸收光线，它的特点是它的吸收性和它的不可见性。这个深渊似乎不是一种物质，然而它并不缺少物质，因为必须有一种物质来吸收光，但仿佛黑就是自己的物质组成部分。巴什拉发现，在所有颜色中，黑色是在想象中最重要，是唯一确实稳定的：“诗人冥想出一切物质的颜色，其中黑色被看作是最稳定的，它否定了所有可以触及光线的实体。”（《土地与对静息的遐想》，1948年，35页）黑色代表着物质性的去除。将这一直觉深化，我们发现，在想象中，黑位于一切事物的核心地带，它象征着物体本质的隐藏，物质的封闭。

物体的暗黑性

然而，物体的不透明性不代表它们对光没有反应。黑体吸收光线，受到这种能量供应的影响，它的温度会升高。这时，它必须通过辐射释放出影响它自身平衡的能量。因此，黑体接收所有的光，它的内部发生了一些变化，然后它将光线以不可见的辐射形式释放出来。它像是一面非常奇怪的镜子，它会将自己接收到的东西进行吸收和转化，然后再把它们释放出来。其他的颜色没有这种暗黑能力，它们只是反射光，是一些表面的能力，缺乏深度的转化。黑体的部分反射遮盖了完美的黑的隐蔽活动。巴什拉强调，这个直觉由来已久。阿那克萨哥拉^[12]说过：“与我们眼睛所看到的不同，由水构成的雪是黑色的。”这个直觉建立在想象的、推翻原本价值观的快乐之上。中世纪的人们希望外表雪白的天鹅内里是黑的。很多作家都支持这个辩证的看法，他们热衷于发现隐藏在彩色虚假外表下的隐秘的黑。奶白色就是这个假象的加强版：“如何更好地表达隐秘的黑色，一个虚假的白色物体中隐藏的罪恶……月光下乳白色的水中隐藏着死亡的隐秘黑暗，带着香脂气味的水有墨水的余味，毒药的辛辣。”（《土地与对静息的遐想》，31页）然而，被逐渐消退的颜色背叛的恐惧只是关于暗黑想象的一种特殊色调。黑体在存在与表象之间保持着更为中性却同样矛盾的关系：它拒绝通过光反射的形式显现，又用尽全力向四周放射出光线。

黑射线

诗人亨利·米肖（1899—1984）描绘的一些幻觉现象，如“黑幻觉”，或者某些梦中的妄想，表明了物体的暗黑辐射倾向。哲学家莫里斯·梅洛-庞蒂（1908—1961）在他的著作《知觉现象学》中，用一段非常有趣的文字分析了这种直觉（因为它绝非现象学上的，最终也无法回归到任何真实的知觉上）：

我说我的钢笔是黑色的，在阳光下我看到它是黑色的。但是与从物体中发射出的黑暗能量相比，这个黑并不明显，即便当它被光线覆盖，也只有在精神的黑暗中才能被看到。真实的色彩始终隐藏在表象之下，如同背景始终在图像之下，也就是说，它不会被看到或者被想到，而是一种非感官的存在。（莫里斯·梅洛-庞蒂，《知觉现象学》，1945年，352页）

根据这个奇怪的描述，当黑暗超越感知时，一个确定是黑色的物体必须无声无息地发光。对于一个像梅洛-庞蒂这样严谨的哲学家来说，让自己进入一个这样的猜想，“辐射的黑体”形象必须是非常强大的，并且它的“黑暗力量”必须对一种深刻的无意识的必然性做出反应。于是，一个关于感知的错误现象学成为一个关于黑体的虚构的准确的精神分析：因为是黑色的，它的黑钢笔躲过了光的运动，黑暗扩散开来。想象力开始在光和暗之间进行角色的反转：在我们最可怕的梦魇中，是不是黑暗在扩散，驱赶了光明？这个可怕的幻想在亚历山大·尤杜洛斯基（1929— ）和莫比斯（原名尚·吉罗，1938—2012）共同创作的系列连环漫画L'Incal中被赞赏：在这个漫画中，一个“影子蛋”吞噬了星星，通过星系传播一种奇怪的黑色的黏稠的辐射，一种会让宇宙陷入黑暗的黑潮。

因此，黑体辐射不仅仅对于物理学家来说是一个谜，哲学家也同样试图理解这样一个反自然形象是如何产生、扩大，并且获得了一种精神认知，以致它变得黑暗或者吓人。也许这是一种类似于第一次接受罗夏克墨迹实验时，形成的“黑色撞击”效应？测试看似非常简单，人的主观性以及神经官能都从中反映出来。想象的黑色光线为类似的原因而烦恼：通过侵入精神空间，它迫使意识思考在无意识深渊中来回摆动的无形事物。巴什拉强调，一个懂得使用黑色的隐秘膨胀作用

的画家，可以以一种非常节省的方式激发深刻而活跃的情感：“于是，一个深刻而复杂的黑色墨点，当它从深处显现出来，就足以将我们置于黑暗的境地之中。”（《土地与对静息的遐想》，90页）这是我们的语言中一种诱惑而神秘的表达：一个辐射扩散的黑体将我们置于“黑暗的境地之中”。黑色的图像出现在如此多的画家和插画家的作品中（我们会从弗朗西斯科·戈雅联想到雨果、奥迪隆·雷东、弗朗坎等），事实上，它们拥有惊人的灵活性和不可思议的能力，可以展现出被压抑的过去的形象，也可以通过扩张来侵扰我们的精神。这种活力使它们既迷人又危险。它们的力量来自想象中的元素，与火、水、空气和土地一样强大而原始的元素：它们在黑暗中展现出来。黑暗元素是一种运动的物质，一种膨胀的移动力量：“所有的黑暗都是流动的，因此所有的黑暗都是物质的，这也是对夜晚的梦的物质思考。对真正的梦想者来说，一个阴暗的角落就可以召唤出对浩瀚夜晚的所有恐惧。”（《土地与对静息的遐想》，91页）对于黑体来说，这种物力论是准确的：内部的黑暗既有吸收性，也有放射性。它不像普通意义上的黑暗一样与光对立，它会吸收光，消化光，最后霸占光的放射力。

这种辐射不是在物理空间中传播，而是在意识空间中传播。从此，黑体的形象不再以其与外部光线的辩证为特征，而是成为穿透内部意识的黑光源。已故的格贝（即乔治·布隆多，1929—2004）用两幅充满讽刺、形而上学的漫画，描绘了这道“黑射线”，当我们的意识从一些偶然的想法中解放出来，我们的意识就会发出这道“黑射线”。这个笑话的精彩结尾（在连环漫画《我在这里做什么？》中）是，人类最伟大的天才设想——黑射线几乎要穿透宇宙的神秘之处，却在最后一刻被一只身上写着“ $E=MC^2$ ”的兔子拦住了去路。爱因斯坦进行了一个聪明的设想，而不是加深自己盲目的直觉。可谁又有勇气在黑暗中走得更远呢？

皮埃尔·苏拉日^[13]的绘画演变说明了这种会吞没意识的黑射线的扩张力量。从1954年起，黑色开始侵入画布的表面。虽然画家好像长久以来都想抵抗，尤其是通过刮擦的技术，消除表面上已经侵入的黑暗，还引人猜想它经过的痕迹。但这似乎无法瓦解整个黑的支配作用，它令人不安的辐射可能会带来光的缺失。同其他颜色相比，苏拉日始终把黑暗看作珍贵的光的缺失：“它缺少最浓烈、最强烈的色彩，而这种浓烈和强烈感被赋予了其他颜色，甚至是白色。”（皮埃尔·苏拉日于1963年与皮埃尔·施耐德的谈话）直到1979年，他才完成了自己的第一幅黑色单色画。艺术家皮埃尔·安珂勒维（1939— ）解释说，

应该超越将黑暗与光线对立的传统观点：“只要光与暗的对比支配着绘画，即便画布上有黑色的出现，绘画作品中的鲜艳的色彩也会威胁到它，因为此时黑色只有在同光线的比照中才能展现绘画的力量。”（皮埃尔·安珂勒维，《因为》，2009年）对于一些评论家来说，这个改变取决于最终承认黑色是一种颜色的事实，以及黑色不是捕捉光线，而是通过它的质地和光辉来展现自己。然而，这种表面的反射并不能解释黑色对画布空间的决定性的整修。单色画的真实辐射在于黑色那种隐秘的超越，当它侵入整个画布并使形态模糊不清的时候，这种超越就会显露出来。当画家不再惧怕会在这种创作中失去个性时，他画出一些黑色，这些黑色不再面向欣赏者的感知意识，而是面向无意识的黑暗旋涡。为了转换为全黑的光彩，意识必须委身于黑暗的元素，而且要知道，意识与意识的内容，两者的区分会彼此消除。这对于本身就微妙的哲学直觉来说是一个难以理解的公式。对于一个研究黑体辐射的物理学家来说，它一点也不比计算活动量子的公式简单。

黑射线

RAYON NOIR



“发射束流”是一个更为贴切的术语，我们为了方便，则称之为射线。

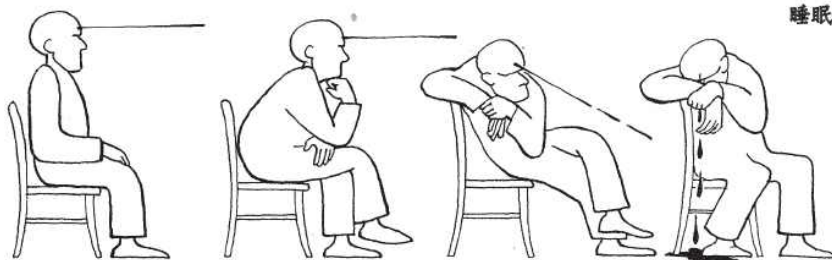
我们把这条射线定性为黑色，其目的是为了将它显像化，就像我们会给消失在土地里的水流染上颜色，以便发现它们的再次涌现。当整个身体最大限度地集中注意力，进行强烈的新陈代谢时，这种非思想的束流从大脑的中心进发，刺穿鼻根上方的前额，饱含正义感地贪婪地向前冲去，试图连接到那些我们迫切需要验证其存在的未知思想的星系。

大脑像一个发电机一样全速运转。

没有任何规则。一切都是流动的。在这个轨迹的尽头是绝对的知识。这就是黑射线。

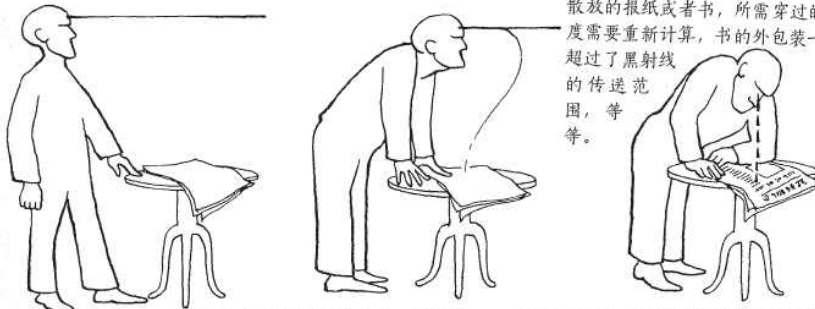
但是……

第一个障碍



睡眠

第二个障碍



构成圈套的事物：

散放的报纸或者书，所需穿过的厚度需要重新计算，书的外包装一端超过了黑射线的传递范围，等等。

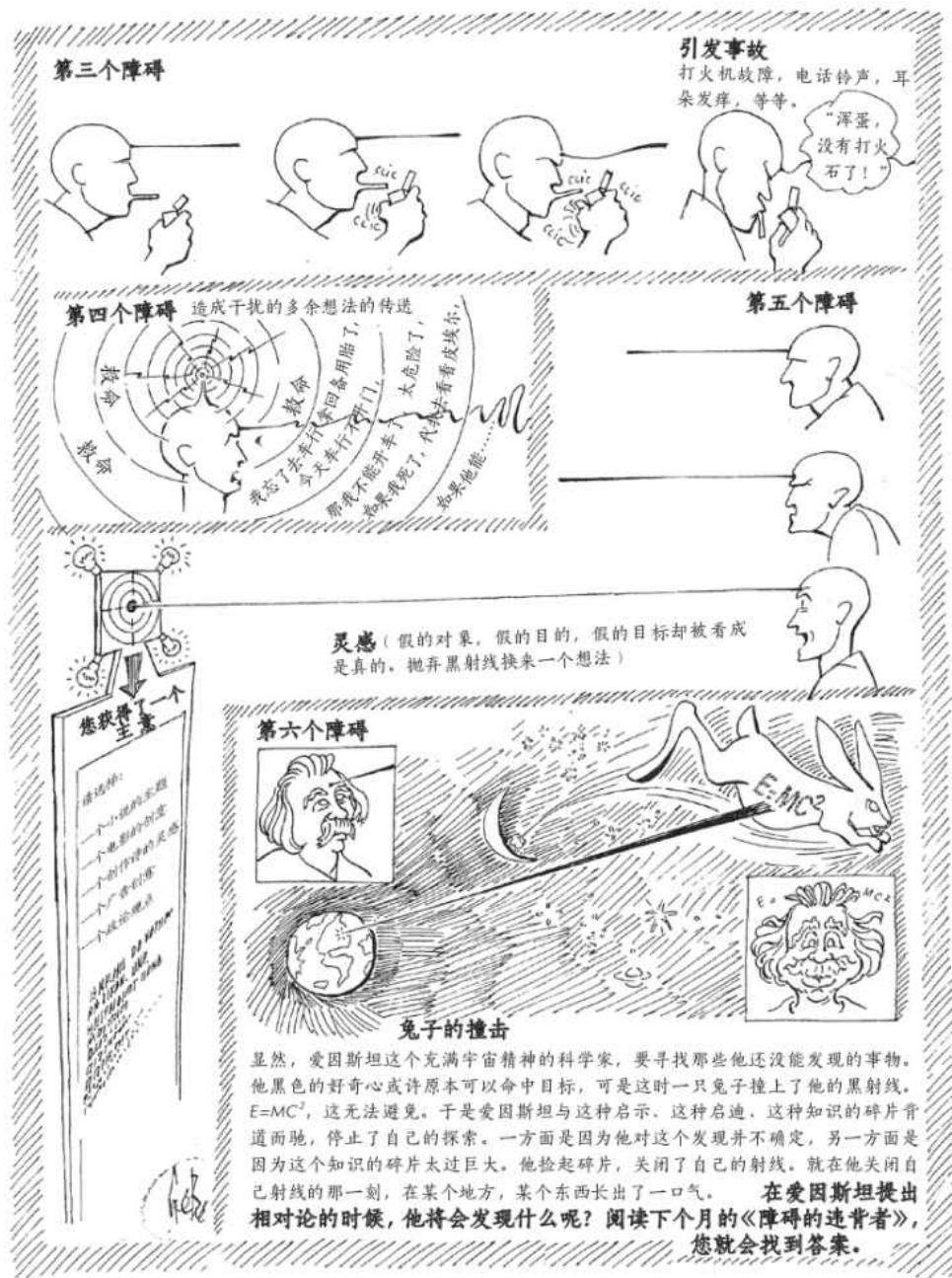


图6. “黑射线”，摘自格贝连环漫画《我在这里做什么？》巴黎，达戈出版社，1983年，50—51页。

潜意识的黑暗意识

1894年，就在马克斯·普朗克发现“黑体辐射不连续”的这一年，保罗·瓦勒里^[14]撰写了《列奥纳多·达·芬奇的方法引论》。在这本略显年轻气盛的书中，他企图把自己放在天才列奥纳多·达·芬奇（1452—1519）的位置上。25年后，他又添加了一些不那么狂妄却同样深刻的

评论。他最初那种想要揭开达·芬奇作品的设计之谜的想法，被试图澄清赋予这些作品意义的非个人意识的愿望所取代。他认为，意识之谜绝对是一个“黑体”。因为意识是吸收一切的东西，却不能显现自己的光。意识是意向性的，引用让-保罗·萨特（1905—1980）的话说，它属于“意识的东西”：我们只有通过意识才能和事物有精神接触，但同时意识也与这些事物存在距离；因此，它总是能够将自己与自己所照亮的东西区分开来，而无法照亮自己。自我意识与意识不可能同时发生又相互区分。仿佛有一种“注意量子”，将意识与意识的内容分开，不可解决的不连续性。因而，意识可以带给我们一切，却不包括意识本身：“这不再是一个吸收一切却什么都不给予的黑体。”（《列奥纳多·达·芬奇的方法引论》，102页）

为了掌握意识本身的概念，瓦勒里在冥想中进行了一种类似被现象学家埃德蒙德·胡塞尔（1859—1938）称为“悬置”的活动，即中止自然的现实主义行为。意识必须要停止对意识之外存在的依赖，才能确定意识的组成部分。胡塞尔和笛卡尔一样，都开始去除自己意识中世俗的内容。通过剥离所有的内容，意识发现自己的意向性结构，也就是说，它只是思想内容（“思想”）和物体目的（“思维”）之间的关联。瓦勒里没有关注这一点，而是完成了一个“悬置”来揭示意向性结构。最终，意识作为必要存在，只包括“两个本质上未知的主题：自我和X”（《列奥纳多·达·芬奇的方法引论》，102页）。同时，他发现了他的意识的“裸体”，这是世界和他的身体之间脆弱的接触面。将注意力转向意识本身，转向意识构成的黑体，他发现，栖身于意识的黑体通过意识来显现：

存在无法自我欣赏，只能欣赏对面的景象。然而，存在感到自己构成了整个夜晚，这个喘息的、被定了方向的夜晚。所有完整的夜晚，狂热的夜晚，静谧有序的夜晚，都是由一些自我约束或自我压抑的有机体组成；夜晚充斥着黑暗，而在这黑暗中，身体器官按照自己的属性，跳动着，呼吸着，发热着，守卫着，在自己的位置上完成着自己的职责。（《列奥纳多·达·芬奇的方法引论》，105页）

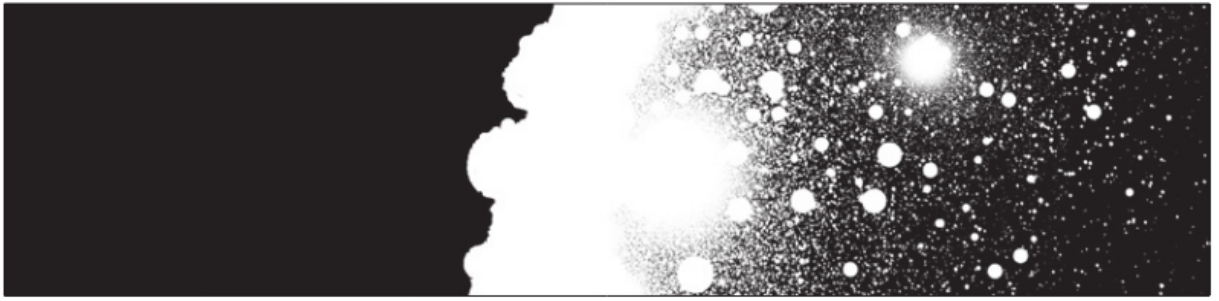
换言之，无法看到真相的意识不会凭空消失，它明白为什么自己既不在意识之内也不在意识之外。它是一个透明介质：在作为外部世界意识的同时，它意识到使意识产生的身体的无意识存在。瓦勒里的自我意识并不像现象学家胡塞尔的那样理想化：意识知道自己是身体与世界的连接点。它可以暂时接受自己无法看到真相，失去知觉，让

自己的目标消散在模糊的黑暗中，从而回到身体与意识之间隐秘的、原始的模糊之中。在日常生活中，这是每个人都记得的童年经历（长大后的情欲体验）：当我们陷入黑暗，意识不再飘浮在我们的身体之上，不再被束缚着，而是成为身体本身，成为恐惧，成为欲望。也许直觉会回溯到更久远的时候，回到在母亲腹中的时空，回到最初的黑暗的温暖中。

无论如何，关于黑体辐射的想象实验的深层含义似乎是要激起一个矛盾的自我意识：它没有在事物的意识中忘记自我，而是成为意识本身，因为它无法分辨任何东西，于是它在成为别的事物的意识之前，意识到了一个黑体的辐射。苏拉日的作品《黑色之外》

（*Outrenoir*）利用的就是观看者的无意识，让观看者停留在这幅作品前，任自己被带入黑暗之中。在观看者与黑暗的交流中，在陷入黑暗的感官愉悦中，在黑色辐射带来的温暖中，意识与源自无意识深处的黑暗力量达成了新的平衡。让-克洛德·菲力和约翰·克莱德·费罗通过自反而有趣的展示（反复展示），正确使用单色画将两个黑体和画布展现在观众眼前。

Part 3



A 黑洞

黑洞既不是洞，也不是黑色的，它的边缘是灰色的。

——米歇尔·卡斯^[15]，《光明中的黑洞》（*Les Trous noirs en pleine lumière*）

1783年，英国物理学家、天文学家，可敬的约翰·米契尔（1724—1793）给皇家学会写了一封信。他在信中提出了一个质量大到光线无法透出的星体的存在。他还假想了一个定位这种星体的探测原理：“如果某个发光体围绕它们旋转，我们根据这些旋转体的运动，就有一定的可能性推断出被作为旋转中心的物体的存在……”1796年，皮埃尔-西蒙·拉普拉斯（1749—1827）在他的《宇宙系统论》中独立地做出了相同的猜想：“一个与地球密度相同、直径比太阳大250倍的发光星体，由于它本身的引力，它的任何光线都不能传到我们眼中。”而他的这个理论和他的前辈的理论一样，并没有获得认同，因为在同时，英国物理学家托马斯·杨（1773—1829）和法国物理学家奥古斯丁·菲涅耳（1788—1827）进行了光的干扰实验，这些实验证明光是一种没有重量的波，因此不受引力影响。然而，在18世纪末被命名为“封闭星体”的这个概念，在20世纪有了“黑洞”这个新名字，并且随之名声大振。

黑洞是什么？

我们都知道，一个被抛向高空的球在达到最大高度后会最终落地，抛球的力气越大，球的高度就越高。这是地球重力的一个表现，因为地球的重力会将所有的东西向地心拉去。球的高度会随着初始速度的平方增加：抛球的速度快两倍，球的高度就是原来的四倍。如果抛球的速度足够快，超过每秒11.2千米（约每小时4万千米），球就不会再落到地球上，而是会彻底摆脱地球的引力。只有行星际探测器的发射器才能达到这个足以摆脱地球引力的速度，让我们可以看到我们身处的太阳系。这个逃逸速度与行星的质量和半径的商的平方根成正比，一个比地球大4倍或小4倍的行星的逃逸速度会是地球的两倍。光的速度约为每秒30万千米，拉普拉斯算出，为了让光线无法逃逸，一个与地球密度相同的恒星的半径应是太阳半径的250倍。显然，拉普拉斯公式只适用于经典物理学中的物质抛射体，不能先验地适用于粒子，即光子，质量为零的光线。

关于引力对光产生影响的缜密研究必须在爱因斯坦于1915年发表的广义相对论的框架内进行。这个理论指出，引力的作用实际上是时空的几何表现，它本身是建立在物质和能量分配之上的，时空因它而变形、弯曲了。自由运动的粒子必须沿着新几何中较短的线，也就是短程线来运动。因此，与经典理论相反，光虽然没有质量，但也会受引力影响，或者更准确地说，是受时空的弯曲影响，它的轨迹在一个巨大的物体附近会偏转。英国天文学家亚瑟·爱丁顿（1882—1944）在1919年的日全食期间首次验证了这一效应。在日全食期间观测到的接近太阳方向的恒星的位置与在一段时间后测量到的这颗恒星的位置之间存在着微小差异，这和爱因斯坦的计算完全相符。这是对于他的万有引力新理论的一个有力证明。今天我们知道，爱丁顿使用的实验器具太不精确了，以至于这个观察结果并不是真正有说服力的，但是，除了这个幸运的巧合之外，科学家又多次重复了这个实验，都明确证实了爱因斯坦的预言。

如果时空的弯曲会影响光线，那么在广义相对论的框架下，我们就有可能再次计算在何种条件下，星体能够限制光线的逃逸。爱因斯坦的理论证实了一个临界半径的存在，当星体的半径小于临界半径时，光线就无法从星体中逃逸。让我们出乎意料的是，计算这个临界

半径的公式与由经典理论推导出的拉普拉斯公式完全相同。这个临界半径被命名为史瓦西半径，以纪念在1915年计算出这个半径的德国物理学家卡尔·史瓦西（1873—1916），这个半径和物体的质量成正比，例如，根据史瓦西的公式，要将太阳转化为黑洞，必须将它的全部质量压缩成一个半径仅为3千米的球体！

在光线和物质无法逃逸的区域外有一个球形的表面，我们称之为黑洞的“视界”（horizon）。它是一个几何表面，不是真实物体，我们赋予它这个名称是因为它和地球的“地平面”类似，都是视线范围的边界。如果说地球上的地平面位置取决于观察者的位置，那与之相反，黑洞的视界是绝对的。它是时空的边界，与观察者的位置无关，并且会将所有的事件分为两类：在视界面之外，通过光信号我们可以在任意大的距离之间进行联系，这就是我们居住的普通宇宙；在视界面之内，由于光线要向中心聚集，因此它们无法在任意两点之间自由移动，联系受到了严格的限制。例如，物质和辐射可以从外部区域传到内部区域，却无法从内向外传播。这甚至证明了“黑洞”这个在1967年由美国理论学家约翰·阿奇博尔德·惠勒（1911—2008）提出的术语，因为在当时这只是一个理论上的可能。惠勒是一个充满想象力，并且对最大胆的猜测也抱有开放精神的理论学家。除了“黑洞”，他还普及了很多极为新颖的概念，比如“多重世界”“虫洞”“时光倒流的粒子”，以及物质与信息之间的平行论。这些概念往往只是人们想象出的观点，但是能证明黑洞这个著名理论存在的证据出现在1971年：天体物理学家们探测到了天鹅座 χ -1，这个二元系统的特征表明它是由一个黑洞和一颗巨大恒星组成的。此后，在我们身处的星系中又发现了大约20个黑洞，其中最大的一个——其质量达到了400万个太阳质量——就隐藏在银河系的中心。正如文森特在下一章中所指出的那样，有一个黑洞存在于银河系中心，这冲击着我们的想象力，但黑洞本身并不是邪恶的，恰恰相反，它有利于银河系的稳定和发展演化。2002年，我们通过观测银河系中心附近的恒星轨道，发现了黑洞的存在。2022年，视界面望远镜项目将通过结合分布在地球整个表面上的无线电望远镜的数据，来制作这个中心黑洞视界附近的图像。目前的观测还显示，在一些活动星系的中心，如M87星系，存在着一个超大质量的黑洞，其质量可以轻松超过10亿个太阳质量！

如果说黑洞确实存在，仍然需要提出一个能够解释黑洞形成的机制。恒星的黑洞——其质量至少是几个太阳质量——是由于一颗大质量恒星（约为10个太阳质量以上）的中心引力坍缩而形成的。事实

上，当恒星达到硅的热核燃烧阶段时，其结实的内核的质量会增加，直到变得不稳定。恒星的内核坍缩并产生一个中子恒星，而恒星的外壳则被一个名叫“超新星”的巨大爆炸吹散。1939年，美国物理学家罗伯特·奥本海默（1904—1967）指出，如果中子恒星的质量超过3个太阳质量（兰道-奥本海默-沃尔科夫极限），星体自身的引力绝对强过所有其他的相互作用，黑洞便形成了。自此，黑洞成为宇宙大爆炸的一部分，尽管长久以来，天体物理学家的的工作仅限于通过观察来探测黑洞存在的间接影响。而这一情况在2015年10月发生了变化，因为美国的激光干涉引力波天文台（LIGO）首次探测到了引力波。物理学家们在所记录的振动中看到了关于一个巨大振荡的证据。在13亿光年外，有两个黑洞，质量分别是36和29个太阳质量，它们以每秒250转的速度围绕共同的重心旋转，最终合并为一个唯一的、巨大的、质量为62个太阳质量的黑洞。3倍于太阳质量的质量差已经以引力波的形式被放射掉了。

在黑洞视界的边缘

黑洞真的是通常描绘中的宇宙怪物吗？不是的！在距黑洞的距离超过黑洞的史瓦西半径时，时空与同质量的正常星体的时空是无法区分的。因此，将太阳转化为黑洞，对行星的运动没有任何影响，而将黑洞想象成一种可以在所经之处吞噬一切的宇宙吸尘器，至少也是一种夸张。只有在黑洞视界这个界面附近，才会出现黑洞特有的时空变形。

我们在黑洞视界的附近会感受到什么？一种对脚和头的奇怪而强烈的拉伸感。你的身体有一定的空间延伸，它的不同部位探索着不同曲度的区域，这些不同曲度被解释为引力场的差异。我们也会在地球表面体验到这种潮汐力，我们可以很容易地观察到这个壮观的结果：由于太阳和月亮的相互作用，就有了海水的潮起潮落。在经典物理学中，重力的强度取决于物体之间的距离。因此，地球上靠近月球区域比位于对跖点的区域更容易受到月亮的吸引，在地球的参照系中，这会引发海水的明显变化。我们的脚，因为比我们的头更接近地球的中心，也更受地球的吸引；从我们的角度来看，这个吸引力是一个拉伸的力量，在地球表面，这个力量的强度非常微弱，不到你体重的百万分之一。在黑洞视界的附近，你的头部感受到的引力和脚部受到的引力之间的差异要明显得多。对于质量为10个太阳质量的黑洞来说，你感受到的牵引力就好像是你被吊起来，巴黎地区的人挂在你的脚踝上一样！而奇怪的是，黑洞的质量越小，这个效果反而越强。这个明显的矛盾有一个简单的解释：潮汐力的强度与造成潮汐力的星体密度成正比。由于黑洞的半径与其质量成正比，所以它的密度（与质量除以半径立方的商成正比）随着其质量平方的倒数而减小。因此，一个质量为100万个太阳质量的黑洞产生的潮汐力比一个质量为10个太阳质量的黑洞产生的潮汐力小100亿倍。所以，我们可以出入超大质量黑洞的边缘：“巨人”黑洞的巨大质量使得电影《星际穿越》的主人公能够进入黑洞之中。

由于黑洞存在而引起的时空扭曲还有另一个影响：当我们向远处的观察者发射时钟信号时，在观察者看来，时钟信号的频率仿佛变弱了。因此观察者会觉得靠近黑洞的时钟比自己的时钟要慢。时钟频率的下降也可以表现为发射光的频率下降：光线比发射时显得更红。

现在，如果你决定穿越这个视界面，并将你这一壮举的图像寄给你的同事，会发生什么事呢？对你来说，在这个穿越的过程中，不会有什么特别的事情发生：黑洞的边界并没有神奇之处。相反，身处视界之外的你的朋友永远看不到你穿过这个界面！随着你逐渐接近这个界面，放映的影片似乎变慢了，因为接收两个连续图像间隔的时间越来越长。时间膨胀的原理就是，几乎相同的图像彼此相连，达到的视觉效果就是你被凝固在你穿越视界面时的位置上。而且，由于光线的变红和强度的降低，接收到的图像很快变得太弱而无法被接收。对于位置遥远的观众来说，在黑洞内部发生的这一部分旅程都是缺失的。在穿越视界面时传输的图像只能在无限的时间之后才能被接收到，而之后的图像将永远无法穿越黑洞视界。

在怪物的肠道中

在黑洞的中心有一个时空曲率趋于无穷的区域，因为整个质量汇聚于此。关于这个“奇点”的描述是一个真正的、依然悬而未决的理论难题，因为这个描述必须考虑到不包括在广义相对论中的量子效应。尽管如此，由于这个奇点不会影响到黑洞视界以外的时空，因此即便我们无法正确地描述它，我们从视界的这一边看到的黑洞的景象却是毋庸置疑的。从理论的角度看，在黑洞的中心只有一个黑暗的区域。

我们还是要探索一下奇点周围的区域。这个区域可以说是一种运动：它不仅处于运动之中，而且由于它的几何形状向中心倒塌，它还会促使所有位于这一区域中的物体运动起来。结果就是：在黑洞的内部物体无法静止不动，并且出现的运动轨迹必然集中在星体的中心，也就是说，我们可以将一个黑洞的内部描述为一个“翻转的”世界或时空。在通常的时空中，我们可以向任何空间方向移动。而时间的移动则只能是由过去向未来：这是一个定向坐标。而在黑洞中，角色发生了反转：黑洞中心的距离成了定向坐标。在测量中，空间代替时间成为一种“必然”，所有的物质都不可避免地发现自己与中心之间的距离缩短。这一情况让我们回忆起克里斯托弗·普里斯特（1943— ）的科幻小说《倒立的世界》的开头：“我的年纪已经达到了一千千米。”但是请注意，改变黑洞内的时间坐标的状态不能让我们就此回到过去和改变因果关系！其实，时间坐标不再代表一个物理上的时间。在这个环境中唯一能够保持一个方向的时间就是固有时间，这个时间是由一个和你一起向黑洞中心自由下落的时钟测算出来的。在黑洞里，固有时间只取决于距离坐标，当距离变短时，固有时间增长。因此，就像在黑洞外一样，一个自由下落的旅行者的固有时间继续向未来流逝。一个明显的区别仍然是，这个未来有一个计划好的结尾：奇点位于黑洞的中心，奇点之上不再有未来。有限的固有时间的间隔出现在穿越视界面的时刻和旅行者聚集在中心奇点的时刻之间。这个间隔的时间越长，黑洞就越大。对于一个质量为10个太阳质量的黑洞来说，这个时间间隔只有千分之一秒，但是对于一个超大质量的黑洞来说，比如那些位于星系中心的黑洞，这个探测的时间可以持续一个小时。

一个不是那么黑的洞.....

在20世纪70年代，英国物理学家史蒂芬·霍金（1942—2018）就黑洞问题确定了一个基本的却出乎意料的结果。通过应用量子物理的规律，他指出黑洞可以放射光线，甚至是放射物质！这个结果似乎与黑洞的定义本身互相矛盾。为了理解这种奇怪辐射的原因，首先要记住在当代量子物理学中，波和粒子的概念都消失了。它们被“场”所代替了，这些物理概念能够描述所有可能的物质状态，无论涉及的粒子数量和能量如何。在这一理论框架中，真空的定义不再是当一切都被剔除时所剩下的东西，而是能量非常小却不为零的场的状态。并且，在微观世界里并不存在绝对的静止，一个系统的能量在微观世界中持续波动。

在真空状态下，这些波动表现为所谓的“虚拟”微粒的短暂出现，这些微粒会从真空中浮现，前提是它们可以迅速回到真空当中。在无限小的情况下，可以说是有可能借用一定数量的任意能量，也就是可能违反质能守恒定律，前提是能够很快偿还这些能量，尽管我们无法直接观察到，这些转瞬即逝的虚拟微粒可以与真实的粒子进行相反的作用，比如改变它们表面的电荷。

如果说能量的守恒被暂时打破，电荷的守恒却始终保持着：虚拟微粒总是以粒子-反粒子的形式成对出现。当成对的虚拟微粒在黑洞视界附近变成有形物质时，这就与我们的主题有关了。成对的虚拟微粒中的一个可能掉入黑洞当中，另一个则逃离到了无穷远。在一个遥远的观察者看来，这似乎是一个粒子从无到有的自动物化。当然，这些被发射的粒子（基本上是光子、电子和反电子、中微子和反中微子）并不都具有相同的能量。霍金指出，光子的能量分布与黑体发出的辐射光的分布具有相同的形状！因此，他能够给予黑洞一个和黑体温度类似的量值，并指出这个量值和黑洞的质量成反比。实际上，一个质量为几个太阳质量的黑洞的温度为十亿分之一开尔文，但是一个质量只有十亿吨的小黑洞发出的辐射热量约为1000亿开尔文。如我们之前所说，从黑洞外的角度看，仿佛质能是凭空产生的。事实上，辐射产生的质能都源自一部分黑洞质量的转换。因此随着辐射的产生，黑洞的质量和尺寸会缩小，天体物理学家称之为“黑洞蒸发”。这是一个发散的过程，因为当质量减小时温度升高，辐射的能量也不断升高，于

是会加速黑洞质量的减小。最终，当辐射能量达到很高时，我们就说黑洞“蒸发”了。

一些物理学家已经有了将微型黑洞辐射应用为能源的设想。只需把微型黑洞安置好，如放在轨道上，并通过定期增补物质来弥补质量的损失以阻止辐散。结果表明，一个史瓦西黑洞的能量生产率最高可以达到5.7%，而一个快速旋转的黑洞的能量生产率可以上升到42%，这两种情况都比热核聚变获得的0.7%的生产率高得多。在科幻小说家查尔斯·谢菲尔德（1935—2002）的作品《麦克安德鲁的编年史》中，作者恰好描写了一位通过从黑洞中汲取神奇能量、创造出第一艘星际推进飞船的物理学家。

宇宙旋涡

和行星以及恒星一样，黑洞也可以旋转。然而情况有所不同，因为一个旋转的黑洞不会像陀螺一样在一个静止的外部空间中转动。黑洞以一种旋涡式的不可抵抗的运动驱动着它周围的时空。一艘运动中的飞船会在它附近的区域里发现什么呢？

为了理解这一点，让我们继续与清空浴缸的水时看到的旋涡来做类比。在这种情况下，水在做一个螺旋运动，这个螺旋运动可以分解为一个围绕出水口的圆周运动和一个朝向出水口下方的径向运动。现在让我们想象有一艘船行驶在湖面上，而湖底有一个类似清空浴缸时的那种旋涡，这艘船行驶到了旋涡附近。船的发动机可以让船的最高时速达到20千米。在远离旋涡的地方，水面依然比较平静，显然船长可以任意航行，因为有发动机的动力，尽管有水的驱动力导致船发生缓慢的偏移，他依然可以校正航向。因此船长不用抛锚就可以控制自己的船和湖岸的距离，他可以让船靠近或者远离旋涡，甚至可以逆水流方向航行。当靠近旋涡的中心时，船只最终会进入一个区域，在这个区域里水流旋转流动的速度和船的最高时速相等。在这个临界距离以下，即使船的行驶方向是旋涡的相反方向，即使发动机全速运行，船也无法保持固定的位置。它无法抗拒地被推向旋涡的旋转方向。操纵船只的可能性降低，船只可能的行驶方向也不再是任意的：船只只能向前移动，旋涡旋转得越快，船只越受限制。舵手可以熟练地摆脱这一尴尬情况，他要把油门全开，根据一个外向的螺旋轨迹正确地定位航向，并将船只引向远离旋涡中心的方向。如果船只冒险地去靠近旋涡中心，那么在一个时刻，水流的径向速度会达到每小时20千米，这就是船只的极限速度。这是真正的麻烦开始的时候：掌控船只航向的可能性变得非常低，于是船只别无选择，只能被拉拽到旋涡中心……

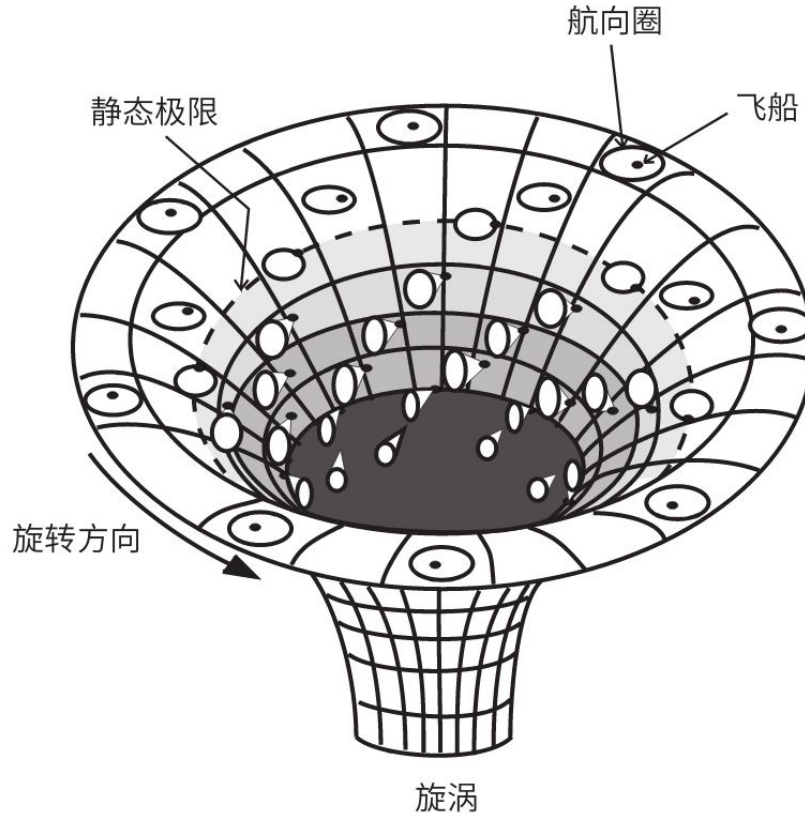


图7.飞船在旋转的黑洞周围的运动：无论航向和飞船速度如何，一秒之后，它必然会进入航向圈中。(© Jean-Pierre Luminet)

在旋转的黑洞周围，情况是类似的。一艘接近黑洞旋涡的飞船也要承受黑洞旋转导致的时空驱动力。这个运动在一个被称作“静态极限”的曲面里成为一种必然。在这个区域内，即使宇宙飞船的速度可以达到光速，它也无法与遥远的恒星保持相对静止！当我们继续接近黑洞时，我们会再看到之前所说的黑洞视界，它是黑洞的真正边界，是一个任何物质都无法逃脱的界限。一个旋转黑洞的视界完全被包含在静态边界内。对于一个旋转的黑洞来说，在静态极限处，时间仿佛“冻结”，发射的辐射被接收时伴随着无限的红移。但是物质和辐射最终会被限制在黑洞的表面。位于静态极限和视界之间的时空区域被称为能层^[16]，因为它的属性可以让我们从中提取出能量。

英国物理学家罗杰·彭罗斯（1931—）想象了下面这个巧妙的机制：在一个远离黑洞静态极限的位置上，我们朝能层方向抛射一个物体。这个抛射物的设计使得它可以在操作者设定的时间分成两部分。如果我们认真挑选初始轨迹，那么其中一部分最终将被黑洞捕获，而另一部分则会穿过能层并被收回。彭罗斯证明，抛射物这样被发出，

可以使得被收回的那部分的能量大于初始抛射物的能量。这就使得被黑洞捕获的那部分在落入黑洞时，运动的轨迹是与一个黑洞旋转方向相反的螺旋轨迹。逃脱黑洞的那部分所收回的能量来自哪里呢？来自黑洞！对于黑洞来说，这个操作最终导致的结果就是质量增加，以及旋转能量下降。因此，旋转的黑洞起到的是一个巨大的能量储备的作用，如果我们足够熟练就可以从中获取能量……

我们可以理解，黑洞的惊人属性自然成了科幻作家最常用的主题之一。这些可以扰乱周围时空的迷人星体，常常被用作通往其他宇宙的“大门”，仿佛我们身处的宇宙还不够大！因此在电视剧《巴比伦5号》中，太空旅行是通过人造黑洞完成的。作家丹·西蒙斯（1948—）在他的小说《伊利昂》和《奥林帕斯》中赋予了莫拉维克人通过黑洞之间的桥梁在太阳系中移动的能力。类似的构思还出现在弗雷德里克·波尔（1919—2013）的《大门》和卡尔·萨根（1934—1996）的《接触》中，后者在1997年被改编成电影。黑洞经历了很多：这个概念从空想的思辨变成了天文学的现实状态，它的独特属性又使它成为科幻小说的中心主题。





B 黑洞引力

在那里，我们可以长久地沐浴黑暗……

——夏尔·波德莱尔^[17]，《世界以外的任何所在》

正如罗兰所解释的那样，“黑洞”是一颗巨大的、密度极高的恒星，因此光线无法从中逃脱。夜晚的天空净化了大地的黑色，黑体的黑色超越了色彩的光谱，而黑洞则又超越了另一个黑暗的关卡，黑色具有一个巨大的引力。所有的光不仅不能驱散这种黑暗，甚至无法从中逃脱。形容词“黑”经历了这样的强化，它也不再只满足于站在光亮的对立面，它对光产生了威胁。它表示的不再是面对光线时的躲避，而是一个会吞噬光线的黑洞……如巴斯卡·基亚所写：“一个黑洞的引力胃口之大可以与光速匹敌。”（《评判的批评》，2015年，92页）在广义相对论的框架下，这意味着黑洞的质量可以将时空扭曲成一口无底的深井：一切都可能掉入这个深井中，再也无法浮现。这是极度的内爆。因为这颗星体已经发生了崩溃，它被称作“洞”。因为它会吸收物质和光，它被称为“黑”。然而，这两个词的隐喻性功能并不太完全。

将宇宙中物质的最密集集合称为“洞”，是不是有些自相矛盾？通常洞是空的，而不是装满东西的。罗兰说过，黑并不是绝对的：所有的黑洞的边缘处都是有点发灰的……然而，我们的遐想必须从探索“黑”这个形容词的含义开始，探索的方式是从关于黑洞的理想判断中而非现实的边缘处获得灵感。从理论上讲，黑洞的黑暗是如此强烈，以至于它会吸收光线，让光线无法离开。这个黑暗被转化为想象，它拥有一个与黑体膨胀截然相反的动力。黑洞以它不可逾越的引力将所有的时空集中在一个奇点上，并禁止了一切与外部的交流。它成了一个湮灭的象征。

宇宙坍缩

人类的意识水平已经不足以让我们理解这种不可抗拒的黑暗吸引力的想象意义，必须上升到真正的宇宙意识水平：黑洞的产生源自最庞大的恒星的死亡。作为时空的奇点，黑洞代表了一个宇宙级创伤。在它的黑暗中，有某一种东西在影响宇宙的结构和节奏，并且损伤了新柏拉图主义者口中的“世界的灵魂”。这个创伤带来了永恒的哀悼：黑洞象征的是对光的不可逆的捕捉，尽管人们认为光是不可捉摸的，实质上光是自由的，并且是永存的。在宇宙的生命中，发生了一些不可逆转的事件和难以逾越的灾难。

我们常把黑洞想象成可以吸入周围物体的虹吸洞道。仿佛整个宇宙必须吸收一切。然而在黑洞视界以外，任何与外界的交流都无法实现，黑洞对空间的扭曲和对其他物体的扭曲无异。黑洞的不可抗拒的命运只会威胁光和物质的存在，而这些存在会冒险地穿过一道命运的视界面：潮汐效应的强度会将光和物质无限拉伸，然后将它们合并到黑洞的质量以及巨大的密度当中。黑洞不会试图遗漏我们，它孤独地延伸着，与世隔绝。远离“静态表面”之上的物质继续着它们平凡的生活，而靠近“静态表面”的物质，即便它们抵抗着这个吸引力，也会有有一种自此陷入崩溃轨道的感觉。它们也知道自己除了任由自己被带走之外无计可施。

因此，黑洞是宇宙坍缩最强有力的证明：没有任何东西可以缓解这种灾难，因为一切太靠近它的物质最终都会被吸入。空间和时间的结构似乎在躲避那些任由自己被吸入的物质。它们没有力气移动或升起。当宇宙的主体部分在静止的坍塌中崩溃时，宇宙变暗了。这黑色的吸引力是巨大的、无法比拟的。这里要考虑到某个可怕的事情，在我们身处的银河系中心，有一个同样非常黑暗的、贪婪的和沉重的存在。隐藏在黑体中心的黑暗抵挡了光线，可这黑暗并不阴沉，甚至还包含着一些温暖。而在黑洞中，黑暗带着一种负面的含义，获得了一种令人担忧的积聚动力。关于空气的想象，巴什拉强调解脱和上升的遐想与堕入罪恶的黑暗深处之间的对立。黑暗将我们吸入旋涡，在深渊的底部等待着我们。一切行将结束的梦中的坠落都完结在黑暗的中心：“好像深渊的黑暗可以擦除一切，仿佛最后坠落的只有一种颜色：黑色。”（《土地与意志的遐想》，400页）在黑洞的召唤下，我们的

脑中充满了学术上的遐想，我们的遐想围绕着这无法抵挡的“深渊的黑暗”的语义世界，屈服于这种颜色魅力的人肯定会有一个不幸的命运。巴什拉用一些造成凄凉回响的词语完成了他对隐秘夜空的再现：“它是坠落旋涡的时空。更远处，在一个完成的坠落中，诗人将会看到黑色。于是‘黑与空’紧密地结合在一起。坠落完成，死亡开始。”（《土地与意志的遐想》，402页）“死亡开始”，这是多么非比寻常的用语啊！它与天体物理学家那个同样令人回味的用语完美契合：“跨越事件视界”。它没有回来，只剩下黑色星体无法逃避的吸引力。这是对浪漫主义诗人所颂扬的不可避免的毁灭的一种迷恋。

忧郁的星体

为了准确说明一个如此可怕的黑色的色彩差异，我们想起了那个经常出现在浪漫主义诗歌和版画中的“黑色的太阳”。没有人能比维克多·雨果更好地描写它了：

在那里，一切都浮现并消失在昏暗的沉船中；

在这个旋涡里，没有边界，没有气窗，没有墙壁，

灰烬不断地从这些曾经存活过的东西上倾泻下来；

当我们的眼睛敢于向下看时，我们看到了底部，

超越了生命、气息和噪声，

夜晚从可怕的黑色太阳中蔓延出来！

（维克多·雨果，“影子的嘴说的话”，《沉思集》第六卷，26页）

每一句诗句都仿佛预示了这场罗兰邀请我们参与的危险旅程：一旦我们离黑暗的星体太近，就会被捕获；一旦我们被捕获，就不可能抓住任何东西；一切都被拉入黑暗的中心，毁灭我们所有希望的黑色的太阳就在那里。

这颗令人忧郁的星体已经出现在了德国画家阿尔布雷希特·丢勒（1471—1528）的绝妙版画《忧郁I》（1514）中。画面展现了一个拥有天使翅膀的美丽女人，周围围绕着权力、财富和知识的象征物。然而她对这些并不在意，而陷在某一种病态的思想中，她的表情中沉思多于忧伤。在她的身边，一只狗打着盹，一个小天使像是很无聊。在夜晚的天空中，一个小恶魔展开忧郁的旗帜，在一颗似乎吸收了所有光线而并没有发光的星体之下扬扬自得地飞翔。积聚的力量占了上风：如精神集中在阴暗的反思上一样，光芒凝结在一颗黑色的星体上。

法国诗人热拉尔·德·内瓦尔（1808—1855）先于天体物理学将一颗恒星的死亡归因于这颗黑暗星体的诞生，这颗黑暗星体使他的诗歌充满悲伤：“我唯一的恒星死了， 还有我布满星星的鲁特琴，带来那忧郁的黑色太阳。”（《被剥夺者》，1854年）他忧伤的梦最终将他推向了自杀。今天，查尔斯·伯恩斯坦（1955— ）创作了美丽却让人不安的漫画《黑洞》，它重现了这个浪漫命运的神话：一种奇怪的疾病导致处于青春期的青少年发生可怕的突变。黑洞象征着一代人生活的痛苦，危险性欲的烦扰以及厌世的年轻人对死亡的迷恋。黑洞可能是卡尔·古斯塔夫·荣格^[18]眼中对人的个性的最高考验：意识到失败是可能发生的，甚至是不可避免的。

忧郁的浪漫神话还取决于这样一种观念，即创造者的个性将灵感的天赋与一种不可抗拒的忧郁结合起来，当这种忧郁诞生于对人类状况清楚的注视时，它就会更加难以抗拒。这个思想并不新奇。自从希波克拉底医学描述了黑胆的特性——这一疾病的产生是由于黑胆汁过量，像是一种严肃而认真的幽默，哲学家和医生们便不再揣测天才和忧郁之间的神秘联系。长久以来被认为是亚里士多德所著的小专论

《问题xxx》中强调天才中有大量的癫痫病患者，这种高级的疾病被认为是由于黑胆汁分泌过多导致的。年代离我们更近一些的艾萨克·牛顿爵士，他提出的万有引力定律使我们设想一个“封闭星体”的存在，光线无法从这个星体中逃逸，这是关于相对论中黑洞的经典预言，而牛顿本人不就是癫痫病患者嘛！

当然，这只是迷信和无稽之谈。发现遮光效应的约翰·米契尔和皮埃尔·西蒙·拉普拉斯，提出广义相对论的爱因斯坦，推测出黑洞存在的卡尔·史瓦西（其姓氏的含义为“黑色的盾牌”），以及赋予这个宇宙奇点一个令人不安的名字“黑洞”的约翰·惠勒，他们并不是癫痫病患者。一个学术性的遐想不会沉溺于星体对天才性格的影响上。相反，我们也不会轻易从集体的想象中剔除模糊的直觉，因为一种过于强大的智慧会将这种直觉不可避免地引向一些可怕的发现。关于黑的传奇引人入胜，它拥有一种难以抵抗的诱惑力：既然蠢货是幸福的，那么智者和学者不是应该生而忧郁吗？他们的思想是如此深沉，以至于让他们心情抑郁。

因此，我们终于自发地产生怀疑，一切最辉煌的最受人尊敬的生命里都隐藏着一种深不可测的忧伤。然而，一个黑洞被间接检测出来，如同一种阴郁的疯狂躲藏在冷酷的智慧之外。为了证明黑洞的存

在，我们必须观察其他星体的旋转，因为如果没有黑洞存在，其他星体就是围绕这样一个虚空旋转，就好像我们看到一些人没有缘由地小心翼翼地做着重复的手势。当遥远的辐射在通过一片明显空白的空间区域后，并传送一幅失真的图像时，当一个乍一看似乎严谨的推理将现实歪曲到无法辨认的地步时，我们可以猜测到一个巨大的凹陷的存在，它改变了我们对空间和时间的感知。如果说银白色的星系是围绕着同样的旋涡旋转，难道不可怕吗？当想到一些恒星在发出过量的光芒后，最后走向崩溃，那些原本由它们发散给宇宙的光线被囚禁了起来，难道不让人感到失望吗？这种失望会让我们忘记在我们之外还有一个世界存在。

如果说黑洞是一个让伟大的精神永远沉没并且无法重新显现的深渊，那么它是一个阴森的象征。然而，将黑洞理解为关于宇宙坍缩的比喻，还是某种意义上的缩小。因为我们要再提一次，一个巨大而美丽的图像，一个真实的、被赋予真正心理活力的图像，总是具有双重性的。

黑洞的光辉

因此，法国古文字学家米歇尔·帕斯图罗（1947— ）在他关于黑色的历史中（《黑色的历史》，2008年）提到，起初，在印欧语系的语言中，有两个不同的形容词来指示黑色。拉丁语中有两个词：一个是“ater”，指的是没有光泽的黑色，这个颜色肮脏而丑陋，后来在法语中变成形容词“atroce”（恶劣的）以及后缀“-âtre”（用来构成一些贬义的、令人忧郁的颜色，比如“bleuâtre”——近蓝色的，“verdâtre”——近绿色的，等等）；另一个是“niger”，指的是美丽的发光的黑色，所有关于黑人特点的词语都由此而来（这表明这种肤色在变成种族主义的偏见之前，是一种令人艳羡的美丽色彩）。孕育出盎格鲁-撒克逊语言的语系中也包含两个形容词：一个是“swarz”，用来描写没有光泽的、坏的黑色，后来演变成德语中的“schwarz”；另一个是“black”，用来描写发光的、好的黑色，后来演变为英语里的“black”。这样的区别是由光泽度来区分的，这让我们回想起，在先人的眼中，如果要从视觉上区分物体，发光度是一个比着色度更密切相关的标准。这也说明，黑色的符号体系始终是两极化的，具有双重性。

就关于黑洞的想象而言，这意味着它并不是要体现对光的哀悼这个唯一的负面价值。黑洞仿佛是一个死亡的星体，因为我们设想它暗淡而无生气；而当我们把它想象成一个明亮而活跃的星体，它就变得令人兴奋，甚至有时很积极。我们假想一个正在自转的黑洞图像，随着它的吸积作用，它的光盘会变亮，而它周围的恒星由于惯性抵挡着它巨大的吸引力，甚至整个星系都在它周围旋转。是黑洞确保了银河系的内聚力，是一个黑暗的中心保持了恒星的聚集。我们同样会想到黑洞的“头发”和“蒸发”，史蒂芬·霍金将这种辐射现象与黑体辐射做类比，以缓和处于暗淡中的黑暗并找寻到能量（通过成对的虚拟粒子-反粒子形式的真空波动）。但是，除了这些严肃的天体物理学概念之外，让我们冒险进入丰富的科幻小说之中（罗兰就是一个狂热的科幻小说爱好者），去发现这些星体的黑暗所带来的非常积极的价值。

有一种科幻类型被称作“硬科学”，查尔斯·谢菲尔德是一个“硬科学”科幻的伟大作家，他在作品《麦克安德鲁的编年史》中假想，如果人类从迷你黑洞的旋转中获得一种几乎取之不尽的能源，会发生什么

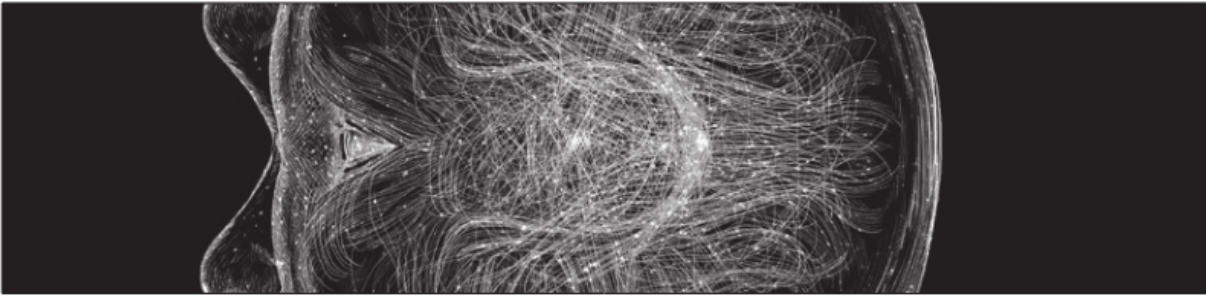
事情。他认为这是将自己推向太空的合适的能源。闪亮的旋转的黑洞成为人类将自己从本星球、太阳系以及银河系中解放出来的方式。

再想象一下，黑洞可以成为我们逃离世界，像夏尔·波德莱尔梦想的一样去到“世界以外的任何地方”的方法。发光的黑洞形象颠覆了关于囚禁光线的想象：黑洞的吸引力，撕裂了时间和空间的跨度，成为想象中能够逃跑的机会。在1979年上映的电影《黑洞》里，一艘宇宙飞船被吸入黑洞中。这艘飞船没有像预料的那样脱离并消减到等离子体状态，而是通过空间和时间被投射出来，黑洞成了一扇闪光的宇宙大门。这种思想在电影《接触》（1997）和更近一些的《星际穿越》（2014）中都有呈现。我们可以从中看出电影编剧对于科学信息的匮乏，甚至有关于“洞”这个词的文字游戏，将“洞”当作了秘密通道，但实际上是灵感来自“硬科学”的科幻，或者它至少足够靠近一些物理学理论家的思辨。

1935年，爱因斯坦和纳森·罗森（1909—1995）发现，通过广义相对论方程得出的一些解法可以让时空的一个区域与另一个区域相连。我们将这些宇宙奇点命名为“爱因斯坦-罗森桥”。20世纪60年代，惠勒通过把这些奇点与蚯蚓在地上挖的洞做类比，将其命名为“虫洞”。它们是时间和空间之间的捷径，一边连接着吸收物质和光线的黑洞，一边连接着“白洞”，也就是物质和光线发射出来的地方。惠勒也确定了它们的不稳定性。1988年，美国物理学家基普·索恩（1940— ）和迈克尔·莫里斯指出，从理论上讲，如果被吸收的一部分物质质量为负，则可以稳定虫洞。那么虫洞是可以被穿越的吗？在我们的认知中，宇宙中并不存在负质量的物质（我们也从来没有发现过白洞）。然而，对于人的想象力（包括天体物理学家的想象力）来说，通过对称图像来平衡一个具有强烈感的图像总能给心灵带来乐趣：白洞之于黑洞，就如同密道之于监牢一样。

这就是为什么说黑洞不仅仅是一个有吸引力且我们无法逃脱的重要星体。当它鼓励想象力超越界限，逃离原本的世界时，它也包含着丰富的形式。坍塌只是太过迟缓的图像造成的倾斜线。一个有创造力的想象力，甚至是像伟大的理论物理学家或最好的“硬科幻”作者的天才想象力，反而会从中发现一种刺激物，将自己从空间和时间中解放出来。

Part 4



A 暗物质

当秘密非常巧妙的时候，它们就隐藏在光明中。

——让·季奥诺^[19]，《恩尼蒙德和其他人》（*Ennemonde et autres caractères*）

事实上，我们发现一颗星体不是通过直接观察它的光，而是通过计算。1844年，德国天文学家弗里德里希·贝塞尔（1784—1846）指出，天狼星自身运动的异常是因为有一颗我们看不到的伴侣星体的存在；18年后，天文望远镜有了很大的改进，我们发现天狼星旁有一颗白矮星。1846年，天文学家奥本·勒维耶（1811—1877）和约翰·亚当斯（1819—1892）指出天王星的运动异常——似乎违背了牛顿的万有引力定律——是因为一颗不知名的行星导致的；天文学家约翰·加勒（1812—1910）根据勒维耶的计算结果，在只比计算出的位置低 1° 的地方发现了一颗行星——后来被命名为海王星。1932年，荷兰天文学家扬·奥尔特（1900—1992）试图通过研究太阳附近恒星的速度分布来确定太阳附近的银河引力场，他得出的结论是，要解释恒星的运动，普通物质仅仅占了所需物质数量的一半。同时，美籍瑞士天文学家弗里茨·兹威基（1898—1974）研究了星系在北天星座后发座（象征物为埃及王后伯伦尼斯二世的头发）星系团中速度的分布。他于1933年指出，用来解释测得的速度所需的质量是星系团质量的十倍。“缺失质量”的难解之谜就此产生，这个难题在近50年的时间内一直没有解开。由于大量的数据表明，宇宙质量的绝大部分是很小或者不明亮的，因此无法被直接观察到，这一问题又重新回到科学家的研究当中。此外，这种暗物质似乎出现在很多不同大小的范围内：它分布在整个星系的范围内，也同样在星系团的范围内，乃至在整个可观测宇宙的范围内。

暗物质的发现

一个跟我们身处的银河系类似的螺旋形星系包含了近2000亿颗恒星，它们聚集在一个直径约为10万光年、厚度约为1000光年、中部凸起的圆盘上（光年是指光以每秒30万千米的速度运动一年经过的距离，约为9.46兆千米）。恒星之间有高温密集的气体，这些气体构成了促使新恒星产生的星际介质。这个由恒星和气体构成的圆盘的动力来源于星系旋转产生的离心力与这个物质圆盘自身引力之间的制衡。大多数恒星的轨道可以被大致分解为在圆盘平面上的旋转运动和垂直于该平面的振荡运动。这个振荡对物质的局部密度非常敏感，物质的引力吸引的作用是一种回动力，与弹簧的回动力相似。扬·奥尔特的方法建立在关于垂直于圆盘平面的振荡分析之上，他由此推导出了圆盘的引力场，从而推断出其质量分布，然后只需将这个质量分布与针对恒星的普查结果得出的质量分布进行比较。为了解释局部的运动，扬·奥尔特认为所需的物质密度必须是他所观察到的物质密度的两倍。如今，得益于依巴谷卫星的天体测量观测，关于银河系盘面的暗物质问题似乎已经得到了解决。依巴谷卫星提供了一个由约12万颗恒星组成的更为公平的、准确的、完整的实验采样，这是扬·奥尔特所没有的。最后，圆盘的动态密度与观测到的恒星密度相符，似乎圆盘中并不需要有暗物质的存在。2013年12月发射的盖亚天体测量卫星正在进行同样的研究，但它的研究样本中包含的恒星数量是依巴谷卫星的8000倍。另外，对恒星动力学的理解始终建立在整个星系的范围上，这个范围比其唯一的恒星圆盘要宽广得多。

星系中的暗物质

美国天文学家薇拉·鲁宾（1928—2016）是第一个通过光谱学来研究螺旋星系旋转的科学家。通过观测圆盘上恒星光线的多普勒频移，可以根据距离星系中心的长度测算出圆盘的转速。这个方法只能达到星系光线的边缘，而这个边缘距离星系中心还有好几万光年。但是通过无线电波对中性氢原子组成的星际云进行观察，可以将距离推进两倍。根据距离星系中心的长度测算出旋转速度，我们就有可能推算出整个圆盘的引力场及其质量分布。然后，我们可以将这个结果与对恒星亮度的限定值进行比较，随着与星系中心的距离变远，这个亮度依照指数曲线减小，大部分质量应该位于靠近中心的区域。如果这个假设是正确的，那么旋转速度在远离星系中心时会先增长，然后在距离更远时，速度迅速下降。但是观察到的结果却非常不同：圆盘的旋转速度在远离中心时首先会增长，之后速度并没有降低，而是基本保持恒定。这表明，大量的物质是位于低光或不相关的区域内，以及圆盘之外。对数以千计星系的系统研究表明，这种异常是普遍的：要解释几乎所有螺旋星系的动力，都需要过量的“暗”物质，即事实上隐形的物质。解释这种异常的一个方法是，设想有一个形如球面的巨大光环，其宽度为恒星圆盘的十到二十倍。然而，为了探测到更远处的引力势能，我们必须对更远处的物体进行观测，如球状星团或卫星星系，以及银河系中的两个麦哲伦星云。银河系光环的宽度大约延伸到了几十万光年，这个光环占据了我们与距离银河系最近的仙女座星系之间空间的很大一部分，并且仙女座星系本身也有自己的光环。如果是这样的话，在一个聚集了几百甚至几千个星系、半径为几千万光年的星团里，会发生什么呢？

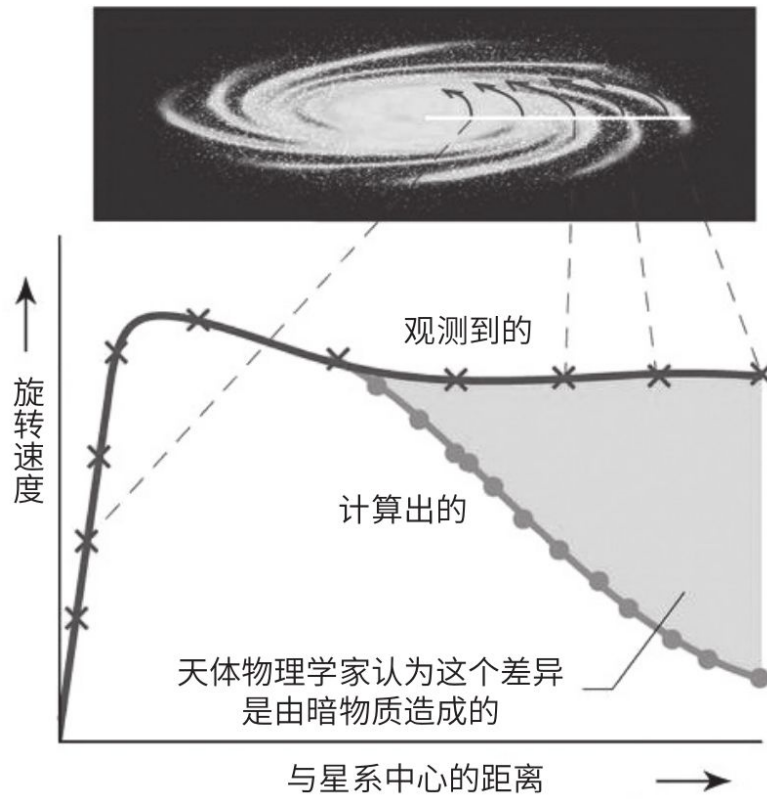


图8.通过直接测量得到的星系旋转曲线与通过从发光物质（恒星和气体）分布推导出的旋转曲线是不同的。这一发现是暗物质假说的起源。

星系团中的暗物质

弗里茨·兹威基在观测到后发座星团中的动力异常后，首先提出了关于星系团中有暗物质存在的猜想。如果我们把一个数量大于发光物质的隐形暗物质考虑进去，这个异常就会消失。兹威基最初的结论是基于维里定理——一个经典力学的结论。维里定理指出，在一个处于动力平衡的自引力体系中，势能的绝对值是动能的两倍。根据两个测出的量，即由光谱测定出构成星团的星系的平均速度和星团的大小，我们可以应用维里定理估计出星团的质量。现在已经证实，即便考虑到由旋转曲线研究推导出的暗物质，用于结合大星团所需的质量也远大于各星系的质量总和。

然而，维里定理的方法并不是完全确定的。首先，我们必须确保对星团中的星系进行正确的计数，避免将星系团以外的星系计算进来，也不能遗漏光度很低的星系。其次，星团并不总是处于动力平衡状态——而这是维里定理的应用条件，这个平衡时间有可能超过宇宙的年龄。最后，我们看到的星团与事实是有出入的，因为所有的距离和速度都是根据其在我们的视线上的投影测量出来的。但是，通过X射线对星团的观察证实了这些得到的结果，这要归功于一些专用卫星的利用，如ROSAT卫星（ROSAT是德国伦琴卫星的首字母缩写）、XMM-牛顿卫星（XMM是X射线多镜面的缩写）以及Chandra卫星（这个名字是为了纪念诺贝尔物理学奖获得者苏布拉马尼安·钱德拉塞卡，1910—1995）。在这个发光的范围内，星团的强烈放射来自一个温度高达100万摄氏度以上的超热气体，在这个气体中聚集了星团中的星系。对星系间气体X射线发射的分析使我们可以同时确定星团和气体的总质量。所有这些信息表明，恒星只占星团动力所需总质量的2%~4%，热气则仅占12%~16%。这意味着，如果要解释星团动力，这里还缺少80%~86%的质量。近期的一个方法证实了这些结果，这个方法旨在分析位于星团外的星系发出的光的引力畸变。

宇宙幻象

自1986年以来，众多的星系团图像展现了变形的星系。最壮观的图像展示出一些巨大的发光弧，这些结构被认为是位于星团后面的星系的变形图像。爱因斯坦的广义相对论预测这是一个“引力透镜”效应。如我们之前所见，广义相对论将时空描述为一个由于物质存在导致变形的弹性网络。光是沿着弯曲时空的较短路线（短程线）运动的，因此光的运动轨迹会由于物质的出现产生偏差。与玻璃透镜导致的光线偏移类似，质量起到了“引力透镜”的作用。

我们根据引力透镜对观察到的发光弧做出了解释，对变形图像的光谱分析可以证实这一解释。实际上，由于宇宙膨胀，一个遥远物体发出的光会发生红移。形变源的红移总是高于干扰星团的红移，并将形变源置于星团之后。比发光弧更常见的是小弧，小弧是星系背景的小图像，由于星团场的影响发生轻微的扭曲。这些畸变的分布、方向和强度使我们非常准确地、可能略带些模糊地重新构成导致畸变出现的星团质量分布。所有这些研究的结果都是质量的增大，它以一种完全独立的方式证实了速度分布研究和X射线发射的研究结果。

宇宙中的暗物质

引力透镜的研究方法可以应用到整个天空。遥远星系和地球之间存在的物质会导致遥远星系的光线发生偏离，我们所接收到的图像会发生轻微变形，这些图像可以让我们重新构成宇宙范围内的质量分布。1996年，法国天文物理学家雅尼克·梅里耶（1958— ）和他的团队着手测定整个宇宙中的暗物质数量，并画出暗物质在星系团之间的分布图。2012年年初，爱丁堡大学的苏格兰天文学家凯瑟琳·海曼斯和不列颠哥伦比亚大学的法国天文学家卢德维奇·范瓦尔贝克领导的团队推进了这一进程。他们选取了前所未有的宇宙范围，并成功地绘制出其中的暗物质。为了勾勒出暗物质的轮廓，他们研究了位于天空四个不同区域的1000万个遥远星系发出的光的畸变。欧洲航天局正在进行的欧几里得天文任务，旨在测定宇宙中暗物质的分布情况，以及自宇宙大爆炸以来这一分布的演变方式。

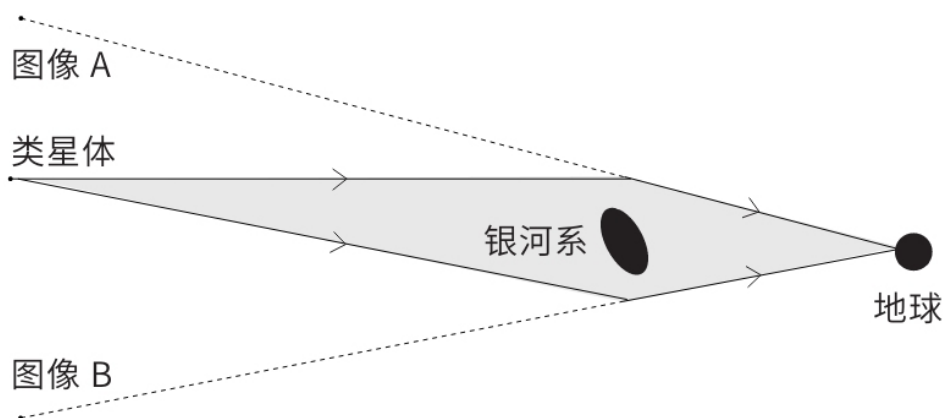


图9.引力透镜效应。一个星系的质量会使遥远的类星体的光线发生偏转。位于地球上的观察者看到的光线图像是多重且扭曲的。

整个宇宙中充满了宇宙微波背景辐射，关于这一辐射的研究使得我们可以确定宇宙的总成分。我们还记得，在2725开尔文的均匀温度下，这道古老的辐射是以黑体辐射的形式被观察到的。但温度微小的不均匀性就会体现出原始物质（未来星系的起源）中密度的不均匀性。在宇宙学标准模型的框架下，对这些不均匀性的统计研究使我们可以估算出宇宙中物质和能量的密度。结果令人惊讶：宇宙中物质的密度比普通物质的密度高出5倍（26.8% vs 4.9%），而且，总密度受

制于迄今未被探测出的能量元素（68.3% vs 31.7%，参见关于暗能量的下一章）。

原始核聚变

另一种观点认为，有一种未知的物质存在。如果我们回到过去，回到宇宙微波背景发射之前，宇宙经历了一个温度高达100亿摄氏度的阶段。由于温度过高，核的强烈相互作用无法确保核心的稳定。因此宇宙流体由核子（质子和中子）的混合物组成，其中有大量的电子、光子和中微子。中微子的作用非常重要：核子不断吸收和放射中微子，它们将质子转换为中子，将中子转换为质子，以达到二者之间的平衡。

由于宇宙的膨胀，温度下降，中微子不再与核子产生相互作用，从而打破了之前的平衡。中子是一个不稳定的粒子，在不到十五分钟的时间内，它就会分裂成一个质子、一个电子和一个中微子。保存中子的唯一方法是将其与质子结合以形成氦原子核。这是核聚变产生氦-4原子核、氦-3原子核和锂-7原子核的第一步。三分钟后，宇宙膨胀导致的冷却终结了这个最初的核作用。原子核中中子的比例是多少呢？这个答案取决于宇宙中包含的物质数量。如果其中核子的数量非常少，质子和中子之间的相撞就很少，产生的氦也会很少，大部分中子会被分解。如果是这样的话，与氢相比，氦-4产生的比例很小。相反，如果宇宙中有大量的核子、质子与中子频繁相撞，核反应有多剧烈，氦-4产生的比例就有多大。而且，物质的总量会影响到膨胀的速度，从而影响到原始核聚变持续的时间：短暂的核聚变持续时间将会对应少量的合成元素。因此，测定出目前氦-4比例的原始基值，我们可以估计出宇宙中由质子和中子（也叫重子物质）形成的物质的数量。我们所发现的值为4.9%，这就证实了，可观测的宇宙中大部分物质不是以发光的形式出现的，气体和恒星只占普通物质的0.5%。

一个新的定律？

然而，暗物质之外的其他假设可以用来解释观测到的动力异常。我们现在要做的不是假设一个新的实体——如暗物质——的存在，保证物理定律不变（“本体论”的方法），而是可以通过修正这些定律来减少理论与发现之间的差距（“立法”的方法）。因此我们认为，修改理论框架是一个可取的方法，也就是说，可以引入一个引力以外的力量，或者对引力法则提出疑问。1983年以色列物理学家莫德采·米尔格若姆（1946— ）提出的“修正牛顿动力学”理论（也称MOND理论，Modified Newtonien Dynamics的缩写词），就是对万有引力定律提出了疑问。他假设在出现微弱的加速度的情况下，万有引力会遵从修正后的定律。这个提法很好地解释了星系内的旋转速度，但MOND理论仅在这个范围内成立。MOND理论被用于描述星系团，尤其是Boulet星团（船底座）的结构，也需要提出一种非重子的物质形式。很多精准的测试限定了新的万有引力定律的使用范围，这些测试也是广义相对论在太阳系中所用过的。另外，关于万有引力的实验是在大范围内进行的，科学家们巧妙地将相关数据与引力透镜、星系团以及星系速度结合起来。他们得出的结果几乎完全排除了一些替代理论。只有引出暗物质的模式是有成果的：这个模式给出了最简单的解释，但同时引出了一个神秘的物理学实体。

暗物质的属性可能是什么？

如果说只有通过暗物质的引力作用我们才能发现它，那么它是由什么构成的？答案很简单：或者是一种已知物质的不发光形式（“重子”物质），或者是物质的未知形式（“非重子”物质），这种未知形式最终会比我们已知的形式更为普遍。那么，它以何种形式存在呢？答案很多。

气体和尘埃通常可以通过它们的发射线或吸收线检测到，因此从这个意义上讲，它们并不是真正的暗的。它们在银河系星盘中存在的数量相对较大，在银河系中，气体质量大约只有10%到15%的恒星质量。但是气体和尘埃的质量仍然不足以解释星系的旋转曲线，光环不可能完全由辐射气体构成：它的平衡温度接近100万摄氏度，这个温度会导致X射线的辐射比我们所观察到的要强得多。一方面，我们对原子氢进行了深入研究，它的数量显然并不够充足；另一方面，分子氢的含量几乎不受限制，但分子氢是不能被直接检测到的。

中子星和黑洞也有可能是暗物质。在宇宙形成之初，第一批超大质量的恒星可能会在自己最终崩塌时创造出大量的中子星和黑洞。为了使90%的重子最终到达中子星或黑洞中，质量较小的恒星（太阳质量的1/2到1/4）的数量必须非常小。问题在于：银河系星盘上70%的恒星都是这样质量的恒星，它们的质量不到太阳的一半。而超大质量恒星在成为中子星或黑洞前，就发生了爆炸，成了超新星，它们的大部分质量在星际间飘散，于是星际间充满了爆炸中产生的重核，如铁。宇宙中重核的数量比我们已知的数量大得多。最后，黑洞接受的星际气体，由于在坠落期间其温度剧烈增高，也必须以能够被探测到的红外线形式进行放射。我们没有探测到任何这种形式的红外过量现象。

还有其他种类的不明亮物体，如褐矮星。这些恒星质量较小，不到太阳质量的8%，过低的质量使它们无法产生热核聚变反应，白矮星也由于体积过小而无法发出明亮的光。它们是类太阳恒星进化的产物。而中子星是超大质量恒星死亡后留下的星体，它们是完全不发光的。

中子星、黑洞、白矮星和褐矮星统称为晕族大质量致密天体，也就是MACHO（Massive Compact Halo Objects）。这些天体的数量足以解释星系中的巨大光环吗？EROS计划（Expérience pour la Recherche d'Objets Sombres，寻找暗天体实验）旨在回答这个问题，每天晚上都有一台望远镜在测定麦哲伦星云（银河系的两个小卫星星系）中数百万颗恒星的亮度。由于银河系光环中的一颗暗星体从已知恒星的运动轨迹上经过时，会导致光线在短时间内扩大，我们需要探测出这个短时间内的增长量。另外，还有一个引力透镜效应。我们经过十年的追踪研究确定，银河系的黑暗光环并不是主要由暗星体组成的，重子暗物质的属性问题始终是一个谜。

此后，天文物理学家大多承认非重子暗物质的存在。他们将希望寄托在中微子这个与物质相互作用非常微弱的粒子上。中微子的质量虽然不为零，但也不足以解释非重子暗物质。我们至多可以认为，中微子对宇宙物质平衡做出的贡献与恒星相当。除了中微子外，粒子物理学还无法确定地知道有哪种粒子可以与非重子暗物质相对应。然而，新的理论发展拓宽了粒子物理标准模式的领域，预测了新粒子的存在，而这些新粒子很有可能是暗物质的组成部分，它们的通用名称是WIMP（Weakly Interactive Massive Particles，大质量弱相互作用粒子），它们是一类大质量的、稳定的粒子，与物质的相互作用很弱。新粒子中最轻的是“超中性子”，它可能就属于WIMP粒子。物理学家们希望能够在大型加速器中检测到它们，如位于日内瓦的CERN大型强子对撞机。他们还试图通过安装在数百米岩石或南极冰层下的探测器来发现它们的存在，这可以对WIMP粒子起到保护作用，避免它们受到其他类型的粒子的影响，以便探测出暗物质粒子与机器中原子的罕见相互作用。这些实验是很困难的，因为它们要面对很多的干扰源。一些实验团队宣称观察到了暗物质的信号，但其他实验团队则宣布这些发现无效。目前，这个问题依然没有答案。未来几年，情况或许会变得明朗，因为实验人员在不断地提升探测仪器的灵敏度。如果在研究人员的努力下，这项研究依然没有成果，那么暗物质的理论肯定很难成立。无论如何，在探究暗物质的起源方面，天文物理学家已经用一种外来的物质填满了整个宇宙，关于这种外来物质的探索很可能是21世纪最伟大的科学冒险之一。





B 暗物质的炼金术

现代诗人重新发现了炼金术士关于黑色的古老遐想，炼金术士们在寻找一种比黑色更黑暗的黑（*Nigrum nigrius nigro*）。

——加斯东·巴什拉，《土地与对静息的遐想》

20世纪30年代，瑞士裔美国天文学家弗里茨·兹威基在后发座的一个星团中发现一些星系的相对速度异常地高。他得出结论，如果这些速度能由引力效应来解释的话，就意味着存在一个质量，它远远大于已经被观测到的物质质量。他的同事们没有被这个结论说服，而是产生了怀疑，甚至剥夺了他检验假设所需的观察时间。兹威基是一个脾气暴躁的人，他因为失去了观察时间而感到痛苦，于是他对同事们使用一些恶意的讽刺。渐渐地，他感到自己被完全孤立，有些人开始到处传播一些关于黑的传说，认为是他性格中“孤狼”的那一面使他被排斥。无论如何，由于大家不愿意听从他的假设，天文学和物理学的发展停滞了40年。而关于暗物质的起源问题，好像就存在着某种我们不愿意看到的东西。

如今，这个借口似乎已被推翻：形容词“暗”和“物质”配合使用，总是意味着发现这种神秘物质的困难甚至是不可能的，但是这种晦涩往往也会对科学研究起到激励作用。几乎所有的天文物理学家都相信暗物质的存在，即便他们并没有亲眼看到过。因此，黑色成了这个假设实体的一部分。因为这种物质是“暗的”，是未知的，所以这个外来的物质激发了科学家们的想象力。它的黑暗意味着通过常规手段无法探测到它的存在，但是这种束手无策不再被解释为暗物质可能不存在的指征。与此相反，它的黑暗反而让这些看似疯狂的理论思辨显得合理！暗物质是所有天文物理学家和粒子物理学家共同寻找的隐藏物质。

一种比黑色更黑暗的黑

为了研究暗物质的假想共振，我们将使用一种神秘艺术的形象以及一种隐藏真相表达的话语资源：秘术语料库。天体物理学与炼金术之间的这种亲密关系，并不意味着古老的炼金术士的研究与当代科学家的研究有丝毫联系。我们是基于想象中的事物提出的这个方法，因为关于秘术的文字勾勒出无数与物质、神秘和黑暗相关的形象，这些文字通常用来描写被炼金术士称作“暗物质”的东西，而它们的另一个名字则更加被人熟知：“苦炼”（或称深渊）。因此，我们将研究的是，暗物质的炼金术形象在接触到关于暗物质的天体物理学假说时，是如何被唤醒并转化的，以及作为回报，它是如何对暗物质进行“上色”的。

和天体物理学家们研究的暗物质一样，炼金术士的暗物质首先是与星体的光相对的：它就像是一个阳光永远无法照到的阴影。德国炼金术士米夏埃尔·迈尔（1569—1622）用一种非常神秘的方式，将这个神秘的阴影与天文艺术联系起来：“在天文学中，阴影的作用非常重要，如果没有阴影，关于这门科学的研究将很难完成。”（《逃跑的阿塔兰塔》，1618年，189页）他的论说从物体投射的影子讲起：“太阳不能穿透密实的物体，因此所有的影子都与事物是相对应的；阴影自然比事物要低等，但是天文学家依然会频繁地使用阴影来做研究，因为它为他们的研究提供了许多便利。”（《逃跑的阿塔兰塔》，1618年，189页）在这些充满奥秘的文本中，我们很难跟上作者的思维，但是似乎在迈尔看来，天文学家对阴影的使用是证明暗物质——这个隐藏在物体内部的阴影存在的有力论据。

巴什拉很喜欢阅读有关炼金术的文章。在讲黑体时，我们已经看到他同样关注隐藏在物质内的黑暗幻象。他特别赞赏这个有悖常理的空想：本质的黑可以隐藏在外部的黑之下。在想象中寻找隐藏的黑，需要我们到达黑的最佳藏身之处的中心，才能发现“在黯淡的黑暗中产生的猛烈的黑，创造着深渊色彩的物质的黑”（《土地与对静息的遐想》，35页）。

兹威基认为，我们对一些星系预计的速度和我们所观测到的速度之间存在差距，这个差距本应促使他的同事们考虑这个引出质量缺失

假说的异常。如果我们始终处于广义相对论的理论框架下，要解释观测到的速度，实际上需要承认我们已知的物质只是宇宙质量的一小部分。当然，兹威基没有完全受限于这个本体论的假设（通过创造新的物质），如罗兰之前解释过的，他可以修正万有引力定律。这种“立法式”的解决方法尤其受到MOND理论拥护者的支持。如果我们对牛顿第二运动定律进行修正（牛顿第二运动定律确定了力的作用与惯性和加速度相关），说暗物质不存在，这并不是真实现象，而只是由标准理论的不足之处导致的阴影，但是，我们已经在炼金术士关于暗物质的思辨中发现了这种本体论的犹疑。迈尔认为，暗物质是存在的，但它不是普通物质，它只是一个阴影，因此与宇宙中可以被观测到的物质相比，它是一种类似于非物质的存在：“阴影是非常有用的东西，即使它更类似于非物质。哲学家们眼中的阴影就是这样的，是一种比黑色更黑暗的黑。”（《土地与对静息的遐想》，35页）于是暗物质的黑有了一个想象中的特殊性：它是“*Nigrum nigrius nigro*”，一种比黑色更黑暗的黑。

天体物理学家的暗物质中包含“*noire*”（黑色的），因为电磁波无法探测到它。我们知道物理学中的黑知识，总的来说，代表着我们无法观察到的东西。然而，与之前物理学赋予黑色的定义相比，我们应该强调：我们无法看到黑洞，但是当它与光相遇，二者就会发生相互作用，黑洞会吸收光线。相反，暗物质绝对不会与相遇的光线发生相互作用，它既不会吸收光，也不会放射光。它只有通过万有引力的形式才会与光和普通物质发生相互作用。因此，暗物质中黑的含义超越了物理学中黑的普通定义，它是一种“比黑色更黑暗的黑”。我们甚至会质疑，“黑色的”这个形容词是否还能恰当地表达一种隐形的、不可触摸的、透明的物质。黑色表达的是一个决绝的隐藏，可奇怪的是，它并不会让我们产生怀疑，反而让我们更坚信它的存在。在我们的想象中，黑色的东西是坚定可靠的。

通过特例假设（甚至在严格的实证主义者看来，是一种形而上学），暗物质源自一种物质化。缺失的质量首先是科学模式中的一个问题、一种异常。如果我们按照英语“*dark matter*”的说法将暗物质直译为“*matière sombre*”（昏暗的物质），那只是一个未定的解决方法，但是暗物质不只是一个简单的假设：它在一些科学的论说中获得了不容置疑的真实身份。当我们将暗物质“绘制”出来时，一些人会把它们呈现为对现实的间接观察，而事实上，当我们为了解释观察到的事物而提出假设，这种“绘制”只是严格地通过数字模拟的方式将暗物质呈现

出来。因为它被称为“物质”以及“黑的”，于是缺失的质量在想象中也是一种确定的存在。

科学家们假定一些没有被观察到的物质是存在的，这并没有什么值得不满。面对与理论预言之间巨大的差异，科学家们只能在两个非常冒险的解决方法中做出选择：修改理论，或者在现有的理论框架下创造一种新事物。目前我们还无法知道这两种策略哪个更好。然而，不容置疑的是，“黑色的”这个称号在这里并不是中性的：它促使我们做出估计而不是产生疑问。黑暗结合了两相反的思想动力：它强化了我们对于暗物质存在的信念，同时它又暗示暗物质是遥不可及的。这种比黑色更黑暗的黑是不是一个神秘人诈死的特点呢？还是这只是它蜕变过程中一个暂时的状态呢？

苦炼

在炼金术中，黑化或苦炼只是一个阶段。在它之前是白色的作品，然后是红色的作品，最后会成就一个被寄予希望的伟大作品。在古埃及，俄耳甫斯教和基督教的圣像中，死亡之后伴随着复活，炼金术士们在获取关于物质的准确知识前，会将黑暗的这个步骤看作一个有害的但是必不可少的阶段：“这个物质，黑色的或者被染黑的，是开启一切的钥匙……这个黑暗指示了真正的操作方式，因为这个物质在变化，它被自然中真正的腐败所腐蚀，而从这腐败中会产生一种新的物质。”（贝尔纳·勒特里维桑，《被遗弃的话语》，15世纪初，428页）作为通向最灿烂的华美之物的钥匙，假设暗物质要被很好地保护起来，似乎也很自然。发现暗物质秘密的兴奋之情是非常具有启发性的，将我们的想象再发散一些，似乎天体物理学家在对魔法石的寻求中，与炼金术士达成了一致，这种一致不表现在他们的调查手段上，而是他们都对自己研究的事物有一种迷恋：他们的黑暗物质都是极为重要并且是隐藏的。难道不是因为它很重要所以才隐藏起来的吗？

炼金术士认为，黑暗物质与土星有着紧密的联系，土星是一个将行星与光圈、古罗马时间之神和铅叠加在一起的象征。土星是黑暗物质之“父”，它将黑暗物质保护和隐藏起来，它将黑暗物质制造为一个拒光的，仿佛是封闭起来的神秘物质：

土星的愿望是将这个金色的孩子包围在自己的身体里，不是以灰色的形式，而是用一种黑暗的光辉……土星用自己黑色的外套将他遮盖……它用触及了死亡当中最高级别物质的自由欲望（金体）组成它的本质；然而它并不是死亡，而是一种代表了天上神圣物质的隐藏。（雅各·波墨，《事物的标记》，1621年，29页）

通过烧烤或溶解在酸中得到的黑暗产物是毫无价值的，但是同粪便相比又弥足珍贵，因为这是创造出可以变铅为金的魔法石这个伟大工作的第一阶段。同样，暗物质在开始时也只是用来解释一个令人费解的异常的一个方法，但是它成了天文物理学的一个圣杯，能够解释清楚它的属性的人就向理解宇宙，以及获得诺贝尔奖，前进了一大步。

宇宙의 阿尼玛^[20]

对于承认暗物质存在的人来说，这确实是一个拂去面纱却并未完全展现的新宇宙：宇宙中的物质比我们所看到的要多得多！因此，普通物质只是真实存在物质的九牛一毛而已。这种理论视角的翻转可以与无意识生命的心理分析发现相比：我们意识到的存在只是在我们精神中出现的一小部分，我们所做的很多事情都无法由我们的思考和有意识的决定来解释。卡尔·荣格的服从精神分析坚持认为，只有当我们能够接受自己真实性格中被压抑的阴影部分，以及不安和危险的那些方面时，我们才会意识到自己的真实性格。荣格将我们心理中的这一方面称为阿尼玛，一个阴暗的隐藏的靈魂，与阿尼玛斯^[21]不同，它是我们个性中被接纳、有价值且积极的那一面。

虽然阿尼玛是人类心理中被动而阴暗的那一部分，但它却是最重要的。如果我们做一个类比，那么，暗物质就是宇宙中的阿尼玛。

荣格在炼金术士的书找到了很多这种心理基本二元性的表现形式，通常表现为雌雄同体。炼金术士的文字和版画中充斥着这样的原型，对于精神分析学家来说，它们是非常宝贵的材料。炼金术并没有真正被实验所限制，它用各种符号进行着游戏，在这个程度上，它可以自由地将集体无意识的原型投射在炼金术的“物质”上。然而，就暗物质的属性而言，天体物理学中也缺少实验的参照点。它发现了一块处女地，这是最具思辨性的粒子物理学所乐见的。事实上，为了弥补巨大的质量差异，天体物理学家首先寄希望于他们所称的“昏暗的物质”上，也就是很难被发现的传统物质，比如白矮星、褐矮星和黑洞。通过这些词组我们发现，这些星体赋予了暗物质一点色彩。但是这还不够，还差得远呢。于是他们呼吁粒子物理理论学家们发明各种各样的外来物质，也就是说，与已知的物质不同，却可以合理地存在于一些理论框架下。于是宏观宇宙和微观宇宙之间建立起了联系。

宏观宇宙和微观宇宙的结合

因此，会出现“冷的”暗物质（其速度低于光速），是由大质量粒子所组成的，但由于这些粒子与其他物质相互作用非常少，因此到目前为止还没有被探测到。同时，也会出现“热的”暗物质（其速度接近光速），已知的三种中微子是它的组成部分。最后，还会有“温暖的”暗物质，它的主要组成部分是第四种中微子，“无效”中微子（我们称之为无效，是因为它不会与物质产生相互作用，并且无法被探测到）。另外，一些炼金术士也会拿他们关于古代原子论中暗物质的猜测做比照：“因为你肯定会很快看到所有如煤炭般的黑色，以及你的化合物中所有成分都会变成原子，你就为此感到欢欣吧。”（乔治·斯塔基，《通过国王封闭宫殿的开放入口》，1645年，672页）这些原子是德谟克利特原子、伊壁鸠鲁原子和鲁克丽丝原子。它们只在形而上学中存在。

对于天体物理学家来说，寻求与物理学的另一个分支达成一致的唯一途径就是进步，可以先验地说，这个方法意味着新的约束。然而，关于暗物质属性假设的增多也带来了麻烦。继续做一个不太礼貌的类比，我们可以猜测粒子物理学家被迫创造出太多的外来粒子，以填补天文物理学家的缺失质量，这种方式就和炼金术士赋予黑暗物质很多名字和符号一样，他们这样做只是为了掩盖这些物质在自然界中不存在并且在他们鼓吹的炼金过程中也无法产生的事实。于是黑暗产物也被称为“黑色的树脂”“燃烧的盐”“熔化的铅”“不洁的黄铜”“氧化的镁”“让的乌鸦”“西方”“黑暗”“霉斑”“死亡”“水星的腐化”，或者是“哈迪斯冥王”。不言而喻，当树脂、盐、铅、黄铜、水星或者氧化镁的首字母都大写后成为术语，这些术语的含义就和它们原来所指的普通事物不一样了。

“乌鸦的头”也是一个经常出现的词组：似乎在“腐化”过程的一个阶段，蒸馏瓶中所含物质的一部分必然会挥发成一种黑色蒸气；因为乌鸦是“黑色的鸟”，所以这种物质被命名为“乌鸦的头”……尽管如此，这个名字也和神话有关：乌鸦也是一种与柯罗诺斯有关的鸟，柯罗诺斯是古希腊人的时间之神，与拉丁人的农神相对应，也类似于斯堪的纳维亚人的生命、死亡、战争和魔法之神奥丁，伴随他的是两只分别象征思想和记忆的乌鸦。词汇的丰富性和符号的连贯性掩盖了物

质参照的空洞。每一个炼金术士都无法解释清楚他所说的是什么，诚如沉迷于炼金术研究内容的专家所说，一个炼金术士只要能够清楚地表达自己，他便不再配得上炼金术士这个头衔。从本质上讲，炼金术是一种隐藏自己假装知道的秘密的艺术。

天体物理学家和粒子物理学家在寻求宏观质量和微观世界变化之间的结合时，透明度在其中发挥了作用。他们对暗物质的探寻同样是不确定的，粒子加速器有效地取代了蒸馏器，但有时实验也会失败。因此冷的暗物质应该由“对称”粒子组成，也就是说，我们会给每一个玻色子对应一个费米子，反之亦然。这些新的粒子迄今为止从未被观察到，尽管“超对称性”已经预测出它们的存在——“超对称性”是粒子物理学家通用的标准模型的扩展。可是截至目前，欧洲核子研究中心（CERN）使用大型强子对撞机（LHC）依然没有发现它们，于是一些理论家认为这个理论可能是“死了”。

热的暗物质是由已知存在的粒子——中微子组成的，但是它们的数量和质量只能解决一小部分缺失质量的问题。至于构成温的暗物质的无效中微子，只有在转化为另一种中微子时才会与物质发生相互作用，因此我们无法直接观察到它。核电站的中微子流量有轻微的不足，只有这一点可以证明它的存在。但是由于这种温的暗物质数量很少，也不足以解释巨大的缺失质量。暗物质当然是解决缺失质量问题的一个方法，但是这个方法本身就是有问题的：它是用黑暗来解释黑暗的，即“*obscurum per obscurius*”。

在这个关于暗物质的遐想结束时，天体物理学家们的黑概念已经变成了一个奇怪的、让人联想到炼金术妄想的黑色形象。我们不要忘记，如果说炼金术中黑暗的作品会让我们想起天体物理学中暗物质的隐秘图像，这是因为科学概念的作用恰恰是要隐藏这些图像。如果我们拿科学的不确定性与炼金术的幻想做比照，则必然招致科学家以及神秘的“炼金术士”的反对。目前，虽然在物理学家们的努力下，我们依然无法看到暗物质，但是这并不意味着我们提出的是一个错误的假设。虽然炼金术确实与科学无关，但其对于一些符号的思考可能创造出一种智慧的形式。

然而，在认识论专家和精神分析学家看来，暗物质似乎是一种仓促而可疑的实体，他们认为，最好继续讨论“缺失的质量”问题，并且记住这是一个公开的问题。然而，MOND作为另一个重要理论也会带来一些困难，而对物理定律进行修正是一个不容轻视的选择。

至于探寻暗物质的精神观点，我们要知道，炼金术不只是一个江湖骗子和投机取巧的黄金商人的技艺。在荣格看来，这也是一种传教式的话语，让人们可以在自我与心灵的无意识倾向中达到契合，来理解自己生命的成熟过程。如玛格丽特·尤瑟纳尔（1903—1987）在她优美的小说《苦炼》的标题中表达的那样：“我们依然在讨论，这种表达方式是否适用于对物质本身的大胆实验，还是说它代表一种将思想从常规和偏见中解放出来的精神测试。”这里有一个美好的用语——“将思想从常规和偏见中解放出来”，这应该是思想在黑暗中摸索前进时的指引线吧。

Part 5



A 暗能量

它如夜晚、如真空般黑暗。

它像是一张底片。

——约瑟夫·布罗茨基^[22], 《山丘》(*Collines*)

宇宙学旨在构建一个对可观测宇宙的严密的描述，这个可观测宇宙也就是所有可以通过光与我们进行相互作用的东西。它是一个以我们为圆心的球体的内部，它的半径约为450亿光年，包含数千亿个星系。为了描述这个我们观察到的整体，宇宙学构建了一个模型，一个基于目前关于地球以及我们对宇宙观测的实验所验证出的物理规律和知识的理想化描述。当代宇宙学模式有一个更加大众化也更为人所熟知的名字是“大爆炸模式”，这个模式建立在阿尔伯特·爱因斯坦在一个世纪以前提出的广义相对论的基础上。在这个模式中，万有引力是以几何学的方式、用弯曲的时空来描述的。具体来说，虽然自由落体运动在牛顿理论中被解释为万有引力，但在爱因斯坦理论中，它被理解为弯曲时空中较短的路径。时空的几何形状确定了物质的运动轨迹，反过来，物质的内容造成了时空的变形。广义相对论方程将时空的几何形状和物质内容密切联系在一起。只有通过一个双重假设才能求解这些高度复杂的方程式：宇宙的几何和物理特性，在一个特定的时刻，在所有的点以及点周围的所有方向上都是相同的。换言之，宇宙是同一的、各向同性的。1915年，爱因斯坦引入了“哥白尼理论”，之后俄罗斯天文学家亚历山大·弗里德曼（1888—1925）和比利时天文学家乔治·勒梅特（1894—1966）分别于1922年和1927年引入了这个理论，“哥白尼理论”将我们引向了简单的宇宙学模式：在任何时刻，空间的几何学特点，尤其是它的曲率，在所有的点和方向上都是相同的。然而，曲率会随着时间而变化，这给这些模式带来了意想不到的动态特征：空间可以膨胀。1917年，爱因斯坦正是基于他的广义相对论框架构建了第一个宇宙学模式。他深信宇宙是静止而永恒的，但他

又发现通过他的方程式最终会得出一些动态的解决方案。为了得到一个与他的哲学信念相一致的解决方案，他不得不将一个常数引入他的方程中，这个常数是唯一被核准的，名为“宇宙常数”。

几年之后，在1929年，人们证实了大范围距离的宇宙动力学。

美国天文学家爱德温·哈勃（1889—1953）观察到，来自遥远星系的光的频率会发生红移。这个现象是多普勒效应造成的：当发射机与接收机之间的距离变大，声音或电磁信号的波长会发生伸展。爱德温·哈勃在可见的逃逸速度和星系距离之间建立了一种比例关系，即“哈勃定律”。在广义相对论的框架下，哈勃的发现可以被认为是宇宙膨胀的结果：空间发生了伸展，于是我们感觉星系之间的距离变大了。哈勃定律的比例系数被称为“哈勃常数”，这个常数量化了宇宙的扩张速度，其精确程度可以达到1%：约为每秒21.3千米比100万光年。根据哥白尼原理，现在一个从另一星系观察宇宙的观察者将获得相同的结果，特别是他会测算出与哈勃常数相同的值。然而，这个宇宙学原理并不意味着过去观测到这个常数的人现在会得到相同的结果，因为哈勃常数会随着时间发生变化。

爱因斯坦只在20世纪30年代初承认了宇宙膨胀的现实，因为这是他的理论结论，但同时也否定了他的宇宙常数。于是，宇宙常数失去了原本存在的理由，并被动态宇宙模式所替代。虽然爱因斯坦抛弃了宇宙常数，它却吸引了其他天体物理学家的注意，因为它可以解决宇宙年龄的问题。当时，没有参照宇宙常数的模式计算出的宇宙年龄约为20亿年，而通过地球化学测量法推导出的地球年龄为45亿年。在勒梅特关于宇宙学解决方法的系统研究中，他注意到宇宙常数可以暂时地“冻结”宇宙扩张，从而校准宇宙的年龄，以便严密地进行时期观察。在之后的几十年里，关于宇宙常数的讨论仍在继续。宇宙学家遇到的问题尺寸。宇宙的年龄是通过估计哈勃常数和可观测宇宙的物质内容来确定的。不幸的是，哈勃常数的测量值和物质内容的清查会根据观察结果发生变化，这使得宇宙年龄的问题也瞬息万变。自那之后，宇宙学家开始做一个系统的清查，目的是对宇宙的每一个组成部分进行编目和“称量”，最新的数据来源于大型星系目录，以及主要由欧洲的普朗克卫星发回的对宇宙微波背景的观测结果。

令人惊奇的观测结果

20世纪90年代末，有两支团队已经开始测量过去宇宙扩张的速度，这两支团队分别由来自加州伯克利大学的索尔·珀尔马特，以及来自澳大利亚堪培拉大学的布赖恩·施密特和来自伯克利大学的亚当·里斯领导。为此，他们观测到远在数十亿光年外的超新星（SNIa）的光通量。这些恒星的爆炸非常有趣，因为它们的最大亮度是可重现的。因此，对它们的可见的光通量的测量等于测算爆炸时发射的光子所经过的距离——这个距离取决于宇宙的几何形状和内容。对这些遥远的SNIa的观测显示，在仅由物质构成的宇宙中，它们可见的光通量比预期的要弱得多。这些超新星的光所经过的距离也比预期的要远——宇宙膨胀的速度似乎加快了。发起这些研究的人因此获得了2011年诺贝尔物理学奖。由于结果出人意料，研究人员开展了关于遥远的SNIa的新研究，其中包括对超新星遗留物的探测调查（SNLS）。从2003年到2008年，通过直径为3.6米的加拿大-法国-夏威夷望远镜，SNLS发现了数百个河外SNIa，而之前的观测数据则约为50个。科学家们为此做出了巨大的努力，因为SNIa很少见：对于一个类似于银河系的螺旋星系来说，几乎一个世纪才会有一次爆炸。在清查结束时，SNLS已经掌握了约500个SNIa，这些超新星采集自过去20亿至80亿年内的宇宙。这些测量表明，在仅包含物质的宇宙中，来自遥远的SNIa的光通量被证实的确低于预计通量。它们与宇宙处于加速膨胀的假设相符。

对于研究者来说，我们必须承认一种能够加速膨胀的能量成分的存在，它既不是物质也不是辐射。爱因斯坦的广义相对论方程中可能包含这样的成分，作为属于平等的“物质含量”方面的附加术语。这个未知的能量成分被称为“暗能量”。事实上，爱因斯坦已经在他的方程中引入了与暗能量相对应的数学术语，以便使这些方程获得静态的解法，这是伟大的物理学家赋予这些解法的特权。于是这个数学术语被指定为“宇宙常数”，它作为方程式中与“几何”相关的部分出现，并被解释为时空的一个属性。但讽刺的是，在哈勃发现宇宙扩张之后，它马上就被抛弃了，而宇宙的加速扩张则需要重新引入宇宙常数这个概念。因为只需调整宇宙常数的数值就可以解释宇宙的加速扩张。

解释的过剩

从物质的角度讲，暗能量是什么呢？它在爱因斯坦的方程式中的出现，可能意味着一个新的物理元素的介入，其属性与普通物质非常不同。例如，随着时间的推移，暗能量的密度保持恒定，而普通物质的密度则会由于宇宙膨胀引起的稀释而降低。由于暗能量的密度不变，宇宙的体积因为宇宙的膨胀而扩大，所以它必须不断地被创造出来。它还具有另一个奇怪的属性：和普通物质不同，它的压力是负的，与能量密度完全相反：它加快了膨胀的速度，而不是使膨胀缓慢发生。

由于宇宙学的观察，我们才能估计暗能量的密度。它的密度非常小：为了给100瓦灯泡供电10秒，我们需要收集10立方千米体积内包含的能量！然而，它却是宇宙构成的大部分内容：它的密度约占宇宙内容的68%，而物质只占32%（暗物质占27%，普通物质占5%）。这意味着，宇宙中95%的组成内容是当前物理理论所未知的成分。标准的宇宙学模式对可观测宇宙进行了很好的描述。然而，物理学家依然需要更多关于这些被认为可以解释观察结果的实体的描述，他们甚至认为这个模式还有存疑之处。

从这些特性的推论中，物理学家已经想象出暗能量的可能属性。第一种可能性出现在量子场论的框架内，量子场论通过结合场的概念（如电磁场）以及量子物理学的规则来描述粒子及其相互作用。于是一个粒子被描述为一个量子，也就是其与相关场的基本激发。同样，真空被定义为能量最小的场，其能量不必一定为零。真空便不再是我们消除了物质和光线、时间和空间所呈现的状态，而是场的状态的一个特殊结构，也就是包含0个粒子且能量最低的结构。根据德国物理学家维尔纳·海森堡（1901—1976）提出的不确定性关系，这个特殊状态可以像其他状态一样是波动的。这些波动会产生所谓的零点能量，可以简称为真空能量。

在这个现代的观点中，真空，也就是量子场的最低能量状态，包含两个部分：真空能量，以及一个由场之间相互作用产生的势能。这个势能与温度有密不可分的关系，因此它可能随时间的流逝而变化，而这只是因为宇宙在扩张时会发生稀释和冷却。有趣的是，真空对于

所有处于统一直线运动中的观察者来说，其出现的方式是完全相同的。这个对称性源自爱因斯坦的相对论原理，它意味着自身与负压有关，并且它的能量密度是恒定的。因此，真空能量与暗能量完全相同。所以，真空能量是宇宙能量的密度的一部分，可以使宇宙迅速扩张。真空能量和暗能量只能是同一个实体。可惜的是，科学家计算出真空能量的密度值比暗能量的密度值高120个数量级！在物理学研究中，预测和观察结果之间从来没有过如此大的差距。

在发现宇宙加速膨胀之前，在科学家们倾向于认为宇宙常数为零的时代，真空能量的问题就已经被提出来了。因此，我们计算出的真空能量密度必须为零，而这与我们之前提到的估计是矛盾的。解决这个矛盾的一种方法是在量子场理论中引入一个“超对称性”。量子场理论规定，标准模式中的每个基本粒子，如夸克或电子，都有一个“超对称伙伴”。这些成对的粒子具有相同的质量，不同的自旋，它们对真空能量的分摊额会相互抵消。因此，不必进行人为的调整，真空的能量就为零。不幸的是，宇宙似乎不是超对称的，因为，以电子为例，它就没有相同质量的超对称伙伴。如果超对称性是相关联的，它就必定会被打破，那么超对称伙伴的质量会比预期的要高。然而，即使在这种情况下，真空能量的密度值仍然比暗能量的宇宙学测定值高60个数量级。

其他物理学家设想出了可以造成宇宙加速膨胀的替代物质内容，人们将这些内容统称为“第五元素”。例如，一个标量场（自旋为零的场）的存在可能导致宇宙膨胀的加速，第五元素模式和观察结果是兼容的。然而，第五元素的短时演变与暗能量稍有不同，因为它不具备相同的状态参量。因此，我们试图以更高的精确度来测算这个参量，它等于能量密度和压力之间的比率（在所选单位内，这个比率是没有维数的）。对于暗能量来说，它等于-1，对于第五元素模式而言，它则不等于这个数值。于是相关的能量密度不再是恒定的，而是会随着宇宙的发展发生变化。这正是宇宙学家想要强调的时间变化。

之前提到的模式假定广义相对论可以正确地描述宇宙范围内的万有引力。但事实也许并非如此。物理学家经常遇到对引力的观测结果与被认为造成该结果的物理元素之间不协调的情况。对于这种情况的解决方法就是，探测出新的物体或者修改引力理论。因此，得益于天文学家奥本·勒维耶的计算，我们发现了海王星，勒维耶曾经通过假设海王星的存在来解释天王星运动轨迹的异常。这一点我们在介绍暗物

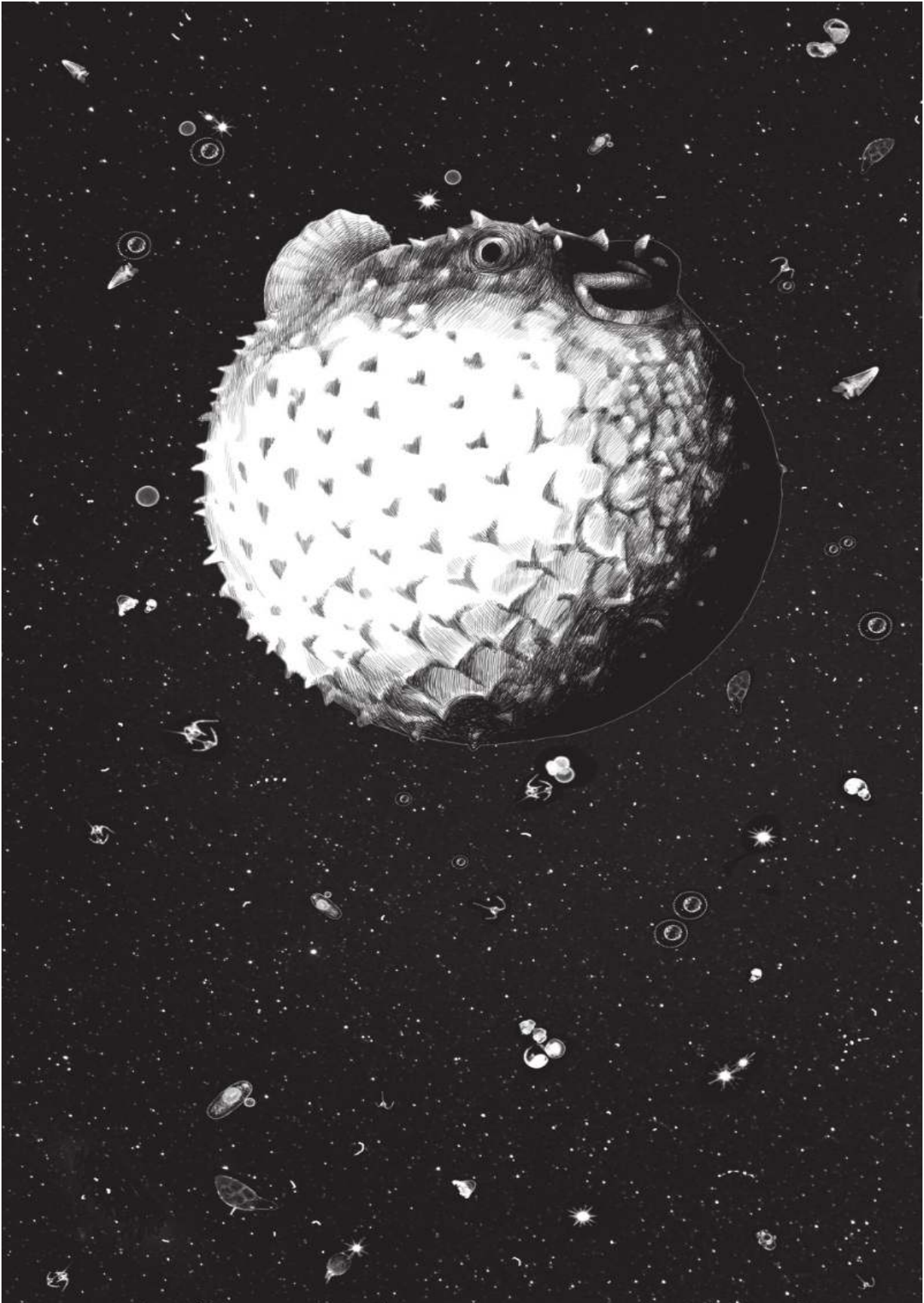
质的章节中曾经提到过。勒维耶试图用同样的方法来解释水星近日点一百年一次的前进现象。但是他并没有成功。在他死后，这个轨道的异常被一种新的引力理论所解释——爱因斯坦的广义相对论。当代宇宙学面临着类似的困境：我们是否应该通过引入新的黑暗物理元素（暗物质和暗能量）来确保万有引力定律的正确？或者我们应当试图修正万有引力定律来解释这些观察结果？

有一种关于修正万有引力定律的方式是，假定我们的四维空间还拥有—个补充的维度，一个伸展向无限的第五维度，只有引力子——驱动引力相互作用的粒子——才能在这个补充的维度中传播。由于如光子这样的其他粒子无法进入这个补充维度，因此我们通常的测量无法涉及它，但它可以通过自己对引力的影响显现出来。宇宙学的影响是非常重要的。在小范围内，引力子逃逸的可能性很小，广义相对论的方程式正确地描述了万有引力。在更大范围内，一定数量的引力子逃逸到第五维度，广义相对论的方程式不再匹配。如果我们假设广义相对论是有效的，那么大范围内的物质的引力效应是被高估的，这个引力效应给人的印象是宇宙的膨胀速度在加快。这个模式得到了众多宇宙学家的响应，但它却带来了很多理论和实验上的难题。我们要强调的是，在远距离修改广义相对论，同时又要承认该理论在普通范围和太阳系范围内的精准测试，是非常困难的。

我们也设想过抛弃宇宙学原理。如果对宇宙微波辐射的观察结果倾向于证明宇宙实际上是各向同性的，那么大范围内的同质性仍然值得讨论。由超新星运动的同质性推导出来的膨胀加速，可能是由局部非同质性引起的。因此，我们不应该将宇宙学重新建立在弗里德曼-勒梅特的空间，而应该建立在托尔曼-邦迪的空间上，因为这个空间的主要特征是拥有一个在围绕中心的空间中发生变化的曲率，这个中心在宇宙中占据特殊位置。这些都是尚未被充分利用且仍然处于分散状态的猜想。

以上我们未能列举全部关于解释宇宙膨胀加速的方法，这说明对这个现象制定出一个物理理论是非常困难的。目前，尽管暗能量是最为天体物理学家所接受的假设，但我们之前所提及的方法都没有得到一致通过。关于解释宇宙加速膨胀的问题催生了许多研究，这些研究有助于我们更好地理解标准宇宙学模式。未来我们将得到的数据，尤其是来自欧洲Euclid卫星计划等主要观测计划的数据，应该会让我们排除掉一些无效的研究方法，帮助我们更好地理解暗能量的奥秘，以

及极大范围内万有引力的特性。迄今为止，造成宇宙膨胀加速的原因仍然是一个悬而未决的问题。





B 暗能量之谜

哲学家对事物的内在属性和原因有着模糊而不确定的猜测，他就像“一个盲人在黑暗的房间寻找一只并不在房间内的黑猫”。

——威廉·詹姆斯^[23]，《一些哲学问题》（*Quelques problèmes de philosophie*）

巴什拉认为，一个将自己的遐想扩展到宇宙空间的梦想家，自然会进入宁静从容的状态：“在关于宇宙的遐想中，有一条中轴线，沿着它，感性的宇宙转化为美丽的宇宙。”（《梦想的诗学》，1960年，157页）是这样—个和谐平衡和永恒稳定的梦想激发了爱因斯坦关于宇宙常数的灵感吗？它不是应该可以抵消万有引力的影响并防止宇宙崩溃的吗？通过给宇宙几何学增加一个术语，爱因斯坦认为他保证了一个同质和静态的状态，也就是巴什拉所说的“安宁”：“安宁是存在本身，它属于这个世界，属于它的梦想者。”（《梦想的诗学》，149页）在宇宙中，存在两种对称的威胁：消失和无限扩张。通过宇宙常数，爱因斯坦已经确定了这两者之间脆弱的平衡点。但是这个梦想破碎了。天文学家通过观察发现，两者间的天平在向宇宙扩张的方向倾斜，然后，更令人惊讶的是，天平转向了一个我们意想不到的方向：膨胀加速。于是这个谜团的颜色，自然变成了暗能量的黑色。

爱因斯坦说，我的方程式像是“一座建筑物，它的一边由精细的大理石构成（方程的第一端边），另一边则由劣质的木材搭建（方程的第二端边）”（《物理学与现实》，1936年，370页）。大理石代表着几何学，以及时空的曲度，而劣质的木材则是宇宙物质内容的象征。然而在希腊语中，木头是 $hylé$ ，它也表示所有的物质。爱因斯坦所说的木头使我们想起了被柏拉图学派的哲学家们称为“第一物质”的东西，它是所有事物的没有区分的底物，是一种没有自己特点的、无形的、混乱的、模糊的物质。

几十年来，科学家们一直忠实于这块坚定的大理石，他们已经满足于宇宙常数以及它的几何非实体性。然后，有一天，也可能是一个夜晚，他们厌倦了扭曲时空的网格，他们穿过了代数的卢比孔河^[24]。他们用自己的方法将hylé变成了一种可塑的材料，他们重新开启了丰富的本体论的潘多拉魔盒。于是，一个梦幻般的、令人不安的想象的力量被释放了，这个想象是关于最后一个也是最强大的黑色形象——黑暗。

只需进行简单的数学操作——通过将一个代数术语换到等式的另一边来改变它的符号——就可以让它的含义完全改变。这是一种在数学中很常见的实验，通过对一个方程的术语进行盲目操作来获得进展。安德鲁·怀尔斯（1953— ）在他1996年的一次访谈中解释道，数学研究就像是在一个黑暗的房间中摸索着探测：“你走进一间房间，你处于黑暗中，完全的黑暗，你偶尔会撞到家具，然后，渐渐地，你知道家具的位置了，最后在大约六个月后，你找到了灯的开关。”另一位伟大的数学家将它比作探索被黑色面纱覆盖着的景观：“这个黑色时期标志着一个数学家踏入未知领域的第一步，这通常是周期的第一阶段。在黑色之后，出现了一道小小的微弱光芒，这让我们觉得某件事情即将发生。”（赛德里克·维拉尼，《有生命的定理》，264页）数学家非常清楚如何驯服黑暗。只有当他在黑暗中停留的时间过长，他担心在夜晚错过了一个岔路口，或是冒险走上了一条什么都没有的路的时候，他才会预感到有问题。当所涉及的不再是纯粹的数学时，在物理学上呈现出来的也将完全不同。因为即使在最理论化的物理学中，针对符号的某一项操作也会导致难以理解的形而上学的结果。于是，将方程式中的一个端边转换到另一个端边，可以将宇宙常数转化为一种神秘的暗能量，反之亦然。

“暗能量”是对dark energy这个短语最常见的一个译法，这个短语是德雷甘·亨特和迈克尔·特纳于1998年提出的，用来表示宇宙膨胀加速的可能原因。在法语里，形容词“黑暗的”和“能量”并列使用，与我们之前研究的案例相比，这个形容词包含着创新的意义。它不仅仅指探测的难度，还指出了我们对所说现象属性的无知：在暗能量的作用下，我们真正陷入了黑暗之中。以至于为了确定这个现象的属性，去参照与这种“能量”截然相反的东西，即与万有引力相反的斥力。于是“黑色”具有了一种前所未有的含义，它既是隐喻性的——表示认知的缺乏，也是思辨性的——表示纯粹否定定义的黑暗。哲学家和神学家知道这个短语，它通过列举自己不是什么来定义一个形而上学的实

体——它是负面本体论的修辞。在承认理性已经达到极限，以及理性会出现无法表达或出现错觉的情况之前，这个方法一直被认为是最后的手段。

所以，能量的黑暗是神秘的。它标志着意义的反转：暗能量是与引力相反的能量。它的消极性使得它在某种意义上类似于黑弥撒的黑暗，黑弥撒是邪恶的仪式，其中使用的祝圣象征被认为是一种用来乞求魔鬼的亵渎和颠覆。这个黑暗的关联，理性的人对此嗤之以鼻：暗能量与巫术中使用的邪恶图像毫无联系……我们确定吗？

黑暗的教训

我们所讨论的能量仍然具有令人生畏的控制力：相较于其他宇宙力量，它逐渐占据上风，并迫使物质在无限延伸的宇宙中被稀释。从长远来看，星系间的距离是如此遥远，以至于它们将像孤岛一样漂浮在无边的黑暗海洋中。我们不再可能知道其他世界的存在，因为它们被推到视界以外的空间，甚至关于宇宙的概念已经消失或只是一个神话。这些黑暗的梦纠缠着被拖入关于暗能量的想象漩涡的人。它把整个宇宙都推向末日的黑暗。黑暗象征着宇宙的夜晚，一切未区分的、恐怖的事物。以米尔恰·伊利亚德（1907—1986）为代表研究这些象征的专家表示，黑暗不是具有完全否定意义的，它们具有潜在性和丰富的根源。《圣经》上讲，上帝是从原始的黑暗中、在孤独和混乱中、在混沌中创造了世界。但是这里说的黑暗出现在世界之前。相反，暗能量就像一台黑暗的发动机，开始时它的影响无关紧要，但随着时间的推移，它的影响力不断攀升。我们所说的黑暗并不是指对原始黑暗的想象，而是对最后的黑暗的想象。伊利亚德在关于“古老宗教中黑暗的象征主义”的研究中强调了 this 极性：黑暗象征着一切先于存在出现的东西，它象征着无尽的虚无——它们类似于原始的混乱，在这混乱中任何形式都无法被分辨，在这个存在的前个体阶段，任何存在的结构尚未出现——但它们也象征着世界湮灭之后的一切，当个体重归枯燥的空洞，与虚无无异时，黑暗在个体消失之后仍然存在。受到暗能量影响的黑暗属于最终的消极的一面。如果它们不是“乌有”，它们仍然象征着存在的不可能性和世界末日。

谁会杀死宇宙？

和巴什拉一样，伊利亚德拿黑暗的流动和水的流动性做比照：世界的坚固程度并不比一颗孤独的水滴更高，接下来，很可能就会蒸发不见。此外，神话对创造世界的描述，就像一座由水构成的岛屿的出现，注定像未来的亚特兰蒂斯一样重新回到水元素中。亚洲、大洋洲和美洲印第安人的宇宙起源说用一些类似于饕餮的形象来描写黑暗向光明转变的过程：饕餮是一种黑色的怪物，阳光或一个发光的孩子从怪兽的嘴中逃脱出来。然而，这个噩梦一定会在我们生命结束时再次来到我们身边，古老的宗教会赋予这个中止我们生命循环的黑色怪物一个名字。但是，在末日的最后，那个将整个世界吞噬在自己黑暗的口中的怪物，我们又应该怎么称呼它呢？在某种程度上，宇宙学家已经开始了针对黑暗的征程，因为他们想要解开这个谜团。只是看到宇宙正在死亡对他们来说是不够的，他们想要知道是谁杀了它。正因如此，他们对暗能量的探寻让我们想到了黑小说当中的某个情节。

“黑小说”这个词组代表了两种不同的文学种类：一种是出现于18世纪英格兰的哥特小说（代表作家有霍勒斯·沃波尔、玛丽·雪莱等），在这种小说中会突然出现一些可怕的生物；另一种是“一战”后美国的侦探小说（代表作家有达希尔·哈米特、雷蒙德·钱德勒等），其中叙述了“辣手神探”浑水摸鱼式的调查。事实证明，对暗能量的探寻使我们想到黑暗的两种形式之间的结合——梦幻和罪恶的结合。

研究宇宙膨胀加速的物理原因，有时会让我们想起一个包含很多叫不出名字的怪物的恐怖故事。大量的假设会带来一个奇怪的本体论：一些理论家提出了“幽灵能量”的概念，这个能量有一种奇怪的特性，在宇宙膨胀期间它的密度会增加，就好像随着恐怖故事的发展，阴影会变得更厚一样。其他天体物理学家之所以给出“第五元素”这个命名，是因为它与四种已知形式的物质能量截然不同（重子物质、光子、中微子和暗物质），这样的命名方式与恩培多克勒和古代炼金术士将以太看作不同于火、水、空气和土地的第五元素的方式类似，但是如果物理学家对恩培多克勒的宇宙起源说有更多的敬意，他们应该将它称为“仇恨”，因为这是分离一切事物的力量的名称：“仇恨所引发的斥力会将每个人分别带走。”（《斯特拉斯堡誓言》）当量子真空的能量被用来解释暗能量时，它通过将广义相对论和量子力学进行融

合，建立起微观宇宙和宏观宇宙之间的联系。另外，暗能量会让我们想起“力量阴暗的一面”。还有其他一些更加“骇人听闻”的假设，但没有一个令人满意。尽管有很多线索，但关于暗能量本质的研究却令人沮丧和不知所措。

因此需要提到的是，美国的黑小说，属于“黑色系列”的小说，也不同于经典的解密小说，因为它无法保证有一个美好的结局。更糟糕的是，甚至无法保证谜题在最后被解开了。有时主人公失去幻想，跟踪失败，让罪犯逃走……悬念达到了顶点。我们对暗能量的遐想可能会变成对一种难以捉摸的存在的追寻。但是我们不应该这么快就丧失信心。在想象中，我们的调查几乎不用关心隐藏在黑暗中的事物是否存在。我们只要相信它们在就可以了。因此，我们要找到一个假想的事物，它就是我们要寻找的罪魁祸首：一个黑色的、强大的、不吉利的事物，是它导致了世界的黑暗，它还能让光明化为乌有。

众所周知，北欧神话的特点是总会以一场巨大的战斗收尾，最后几乎所有的神、巨人和男人都会死亡，这被称为诸神黄昏。战斗之前有三个没有太阳的冬天。第一次提到这个世界末日是在《诗体埃达》（13世纪）中：芬里厄狼以及它的儿子哈提和斯库尔分别吞噬了星星、太阳和月亮，让世界陷入黑暗。因此，芬里厄狼是理想的嫌疑犯。当它被北欧诸神收养时，它还只是一只小小的狼崽，然后它开始迅速地长大。当北欧诸神得知它会毁灭神族时，他们认为要锁住它，他们使用的链条是黑暗精灵用一些不再存在的物质制成的（猫的脚步声、女性的胡须、山的根、鱼的气息等）。被主人欺骗，被捆绑到时间的尽头，我想我们可以理解芬里厄狼为什么会积累一股可怕的报仇欲望。杀死奥丁，吞噬星斗的芬里厄狼是理想的罪犯。

但是这里有几个细节不太说得过去……首先，芬里厄狼不是黑色的，它是灰色的。如果说黑色是北欧众神中某一个人物的特点，那么它应该属于夜晚女神诺特——巨人纳尔弗的女儿。她乘着一匹黑马拉着的二轮车遨游天空，在她之后，她的儿子白昼之神达古给大地披上玫瑰色的光辉。她一点也不像罪犯。因为这黑暗在北欧人看来与邪恶无关，如我们之前所说，奥丁的两只乌鸦就是黑色的。其次，《诗体埃达》中攻击芬里厄狼的证词并不是非常可信。它是很晚才被一位冰岛的牧师撰写出的，此时多神教在面对基督教的挑战时已经失去了自己的阵地，里吉斯·博耶认为这个作者怀有偏见，他难道不是要摧毁所有的异教神，以表示旧信仰的时代已经结束了吗？他难道不是因为受

到《圣约翰启示录》的启发吗？所有这些都表明，芬里厄狼的罪行可能已经被完全夸大了。

换句话说，这可能是一个诽谤性的谴责。要解决这个疑问，应该决定宣告芬里厄狼无罪。

那其他的嫌疑人都有谁呢？在埃及诸神中，巨蛇阿波菲斯是黑色的，是在一天结束时吞噬太阳的躁乱化身。它应该去承认被指控的罪行，因为它非常想要吞噬太阳。但是所有的证词都描写到，太阳神拉在赛特的协助下，将巨蛇打得落花流水，它最后甚至被猫女神芭斯特切成碎片。总之，它尽可以自吹自擂，每次它都会遭到重击，只有在日全食期间才能短暂地占据上风。然而，埃及神话给出的线索并不止于此，因为人们可能会有疑问，阿波菲斯是否只是用来转移我们对另一个更强大的神的怀疑，真正的罪魁祸首难道不是赛特吗？他有一张黑色的嘴；据说他是“力量之主”；他娶了死亡女神奈芙蒂斯；他杀了自己的兄弟欧西里斯，并把他的手下驱赶到世界的各个角落；他还娶了狩猎女神阿娜特和爱的女神阿斯塔蒂；他还迫害他的侄子荷鲁斯；还有传说讲到，阿波菲斯不是他的敌人，而是他的伙伴！赛特这个阴谋家让大家相信，他要对抗黑暗的力量，并将攻击阿波菲斯的行动推给太阳神拉，于是他秘密地策划了黑暗战胜太阳之光的最终胜利。

赛特是如何回应这个指责的呢？首先，他不是黑色的造物：我们称他为“红色之神”。其次，他有很多美德的表现：对拉美西斯皇室来说，他是一种残酷的却非常积极的力量。最后，他声称是因为这种以貌取人使他受到不公正的对待：他是外族人和红发人的神，他掌管着沙漠的干旱和贫困、雷声和闪电，以及一切打破了既定的秩序和受到迫害的东西。他是双性的神，是长着豺的头的，是未被赏识的神。总之，他打乱了所有这些线索，由于缺乏证据，我们也只得宣布他无罪。

下一个要传唤的嫌疑人是古希腊神话中的黑夜女神倪克斯，她就住在案发现场——“东方的边界”，世界的尽头。但她有一个不在场的证据（她经常旅行），并且她没有力量获取众星的权力。事实上，神话中的任何造物都是没有力量的（或者应该说是抵消的力量，因为我们要体现的是反重力）。再多的寻找也是徒劳，我们无法在神话中找到一个能够象征最终黑暗的有力形象。

实体的迷幻

让我们回到出发点：对能量的拟人化是不是一个错误的路径呢？是否不知名的宇宙常数才是真正的罪魁祸首？一旦宇宙常数的数值发生变化，它就会加快宇宙的缺失。可是它太抽象了，没有物质的相关性，这打消了我们的疑虑。只要它始终属于爱因斯坦方程式中的几何部分，斥力的来源就是宇宙本身的内在结构：这意味着它就是如此，我们并不知道其原因。这就是为什么它没有给假想的投影留下太多空间。因为我们很难幻想宇宙视界之外的东西。

在我们的认知中，只有一种空想可以在宇宙视界之外冒险，那就是新柏拉图学派的空想。这个空想是令人起敬的、复杂的、思辨的，它塑造了自己的概念来驯服无限的扩张力量，并像爱因斯坦为永恒宇宙设定极限一样。然而，它像新的起点一样适应着我们追寻暗能量的宇宙学遐想，因为随它而来的是关于“流射”的记述。在歪曲某些规律的情况下，流射可以提供一种想象的叙述，这个叙述能够紧跟宇宙学的发展，或者回归到宇宙学。但是你必须知道：将新柏拉图学派提升到第一个原理是很困难的，并且关于流射的叙述与科学模式一样抽象。

普罗提诺（205—270）、普罗克洛（412—485）和达马修斯（460—537）等人创立了新柏拉图学派的“空想”。这些哲学家是这样进行思考的：要解释某一个事物，即解释为什么事情是这样的，必须找到其中的原理。但是我们只能在更高的现实等级中找到这个原理。这种自下而上的方法创造了“实体”的等级制度，这些实体都是更低等级的现实的原理。在普通语言中，动词“实体化”是将一个动作名词化（例如，当我们说“喝的和吃的”^[25]），但是在哲学语言中它具有贬义的含义，特别是自从康德强调“仅仅因为从逻辑上需要某个事物来证明另一个事物的存在，就假定这个事物是存在的”，这样的实体化是不合理的。

康德认为，每当我们把假设的必要性转向对实体的确定性时都会发生误解。例如，当一些天体物理学家把暗能量看作是观察到的现实时，它就被实体化了，而事实上它只是一个解释扩张加速的假说。

如果现在实体的概念会引发认识论的一些怀疑，那么古老的新柏拉图学派的形而上学毫无保留地表现出它对逻辑和目的论的信赖，而目的论就是为了解释一个事物的存在而假定另一个事物的存在。因此，为了解释自然生物的形式，就要假设它们拥有“灵魂”，一个赋予它们生命的本源。再比如，星体运动的圆形轨迹服从于与它们静止的代蒙^[26]相符合的愿望（因为圆周运动是最接近静止的运动）。心灵，也就是所有灵魂构成的整体，是我们在上升过程中发现的第一个实体。并且在所有的灵魂中，最高级和最重要的当然是“世界魂”，它可以调节整个宇宙的呼吸节奏。然而，如果没有更高级的、永恒的并且完全清晰可知的实体来确保时间变化中它们身份的统一，人们就不会理解灵魂在时间和空间中如何起作用。第二个实体是超越了时间和空间的上帝（希腊语中称为逻各斯），它将所有心智的存在汇集在一起，而这些存在中最重要的不是神，而是数字。其中最基础的是“一”，因为它统一了所有数字和所有其他的存在（从专业性的角度来讲，存在着两个“一”：一个是“统一”，通过不断的求和来产生其他数字；另一个是真正意义上的“第一”，它让所有数字拥有自身的单位数，比如，五个这样的单位数就是一个数字，也就是5）。

看到这里，你是不是觉得有些复杂和抽象，甚至还有些晦涩难懂？普罗提诺的推理并不止于此：所有的存在构成了上帝的实体，但是上帝又是如何保持他的统一性呢？当然不是通过我们刚提到的“一”，因为它只是一种本质。即使它是所有数字中最重要的^[27]，它也无法从上帝那里独立出来以适用于一切。在新柏拉图学派的思想中，存在一种尊重，这种尊重针对的是逻辑的严谨性、定义以及避免集合理论内部发生矛盾问题的层级区别：“一”不可能成为它所在集合的统一原则，就像数学中没有“所有集合的集合”一样。存在之所以不能构成它的统一性，是因为在存在之前有一个非常重要的实体，这个实体是所有存在的来源，也是所有存在统一性的原因。通过这个基础原则，我们甚至不能说它是（或者不是），因为这会误解它的属性，并且把它描述为一个存在。普罗提诺将最高级的实体称为“太一”，因为它赋予了上帝统一性，并且它身上不存在任何存在或灵魂多样性的痕迹。

至此，上升的过程完成了，关于流射的故事就可以开始了：“太一”流射出上帝。然后（但是这里并不是按照时间的顺序来排列，因为此时时间还不存在），上帝有着内部的“行列”，创造出连续的数字，然后创造出所有的存在，直到他产生了关于灵魂的想法并让灵魂充分

流露，于是他创造出一个时间中的现实：心灵。心灵是所有灵魂的整体，在时间和空间中赋予自然以生命，而自然则赋予物质以生命，但心灵本身不再是任何事物的起源。因此，围绕我们的物质的东西，是最后的、最低的现实，而这些现实再向下，会碰到最低的底限，也就是“第一物质”，它是一种没有任何特性的无形物质，因为它只是所有形式的消极容器，除此之外几乎什么都不是。

关于流射的故事具有很强的逻辑严密性，它将造物神的所有独断的干预全部排除在外。“太一”对于任何神灵来说都是最高级的实体：它是所有人类尊奉的神的起源（这些神都只是一种存在）。关于宇宙常数的想象，无论对于神正论还是对于宇宙起源说来讲，都可能是新柏拉图式的。但它可能是一种颠倒的、曲解的新柏拉图主义，黑色的新柏拉图主义……因为黑暗属于无形物质，不属于“太一”，而从隐喻的角度看，“太一”比其他一切感性的事物都要更接近光的无法触及的美。普罗提诺拒绝将一股能够打破宇宙永恒和谐的力量实体化。他可能会坚定地爱因斯坦站在一起，要建立一个静态的、永恒的美丽宇宙。暗能量的斥力推翻了流散的动力，抛弃了流散的动力，也超越了限制。普罗提诺关于流射的叙述并不能抵挡加速扩张中宇宙常数的翻倒。

然而，新柏拉图学派的形而上学依然有应对的方法。它可以向上追溯到一个可以超越所有限制的起源。在普罗克洛的《神学要旨》中，最高级的实体被称为“无限的力量”（apeiron dynamis）。其中apeiron意味着“无限的”，无限让我们想到了暗能量的扩张力量。但是让我们困惑的是，普罗克洛还将apeiron dynamis称为“第一物质”，而它没有结构和同一性。因此，力量有两种“无限的”物质：抑或是一种绝对的超力量，可以流散出所有的存在；抑或相反，是一种绝对的消极性，丧失了所有的性质。这个体系被挤压在来自上方的无限力量与来自下方的无限力量之间。当然，宇宙的永恒不受质疑，但是在这种极性中，我们难道找不到一个和暗能量相匹配的形象吗？在当今的宇宙学中，我们的研究从一个无限的力量到另一个无限的力量，从“大爆炸”到化为灰烬的宇宙。暗能量的形象是颠倒的流散，变为退化。

如果我们有了这样的想法，恐怕就停不下来了。因为无限力量的巨大差异不是新柏拉图主义中最后的黑暗形象。达马修斯达到了提问的最高形式，只有他敢于提出这个问题：“起源的起源是什么？”他将逻辑推理推向了极限，甚至可能超过了极限，换来的是巨大的难解之

谜。用米歇尔·德菲斯（1070—1140）的话说，它“像墨一样黑”。事实上，达马修斯仍在理性的范围内做推理，他创造了如纯酒精一般绝对的、令人晕眩的形而上学，也就是黑色的形而上学。

他断言，宇宙，作为事物的“一切”，一定是有起源的，而这个起源不属于“一切”。那么，它是什么呢？这很难说，因为我们能够想到的都一定是属于“一切”的某种东西。但至少，我们可以说它不是什么（这里是否定的本体论的修辞）：这个起源不是自然，不是心灵，不是上帝，因为它们都是“一切”的一部分。它也不是“一切”本身，因为显然我们无法是自己的起源。它甚至不是普罗提诺眼中的“太一”，虽然“太一”由于其单一性，是最接近的。它之所以不是“太一”，是因为“太一”与它所赋予统一性的东西不同，所以它的定义是通过它与“一切”的关系来确定的。甚至普罗克洛的无限力量也是通过它与自身之外的东西，也就是极限，来确定的。而我们要找的是一个绝对的起源。

必须承认，所有这些否定与绝对起源的本质都没有关系。达马修斯认为这样很好。因为归根结底，当我们对绝对的追寻行将结束时，在我们眼前的一定是无法形容并且不可知的事物。我们要接受的是，思想会消失，会堕入深渊，会陷入“乌有”。“太一”是一个美丽的、简单的、纯化了的观念，但是真正的绝对必须摆脱所有的感知，即使是最崇高的思辨。然而，除了虚无，还有什么能摆脱所有的思想呢？有两种形式的“乌有”：一种是高于“太一”的“乌有”，另一种是低于物质的“乌有”。达马修斯延续了普罗克洛的解决方法：虚无比无限更使形而上学无所适从。人们也能感到，他的话语近乎黑暗中和沉默中的神秘的崩溃。仿佛这最后一位新柏拉图主义者，冒着极大的风险，使用最后的自卫手段，完成了他关于千年的形而上学的最后探索，之后这个空想就会回归沉默，被名为“自我的起因”的造物神的宗教而摧毁——柏拉图学园屈服于庸俗宗教的迫害，这些宗教几乎不受逻辑限制或严密思辨的约束。这可能是我们应该从中吸取的教训：过度地寻找绝对的形象，我们可能会通向虚无，而错过了一种并非难以捉摸的思想和知识。

不必失望：并非一切都是黑色的！

在电影《穷途末路》中，珍·茜宝问让-保罗·贝尔蒙多：“在悲伤和虚无之间，我选择悲伤（此处引用自威廉·福克纳的《野棕榈》），你呢，你会怎么选？”这个问题象征着想象精神分析师在面对暗能量之谜时的困境：他要么开始对难以捉摸的怪物进行绝望的追寻，要么继续寻找难以接近的起源直到虚无。在这部黑白电影中，男主人公选择了虚无，因为在他看来，悲伤似乎是愚蠢的妥协（这也预示了他悲惨的、“可憎的”结局）。

我们难道不能摆脱这个困境吗？我们难道不能摆脱黑色形象的束缚吗？在这个抉择中存在着某种过于阴暗的东西，我们会毫不迟疑地接受它。此外，一些天文学家和天文物理学家发现了第三种途径：如果我们放弃宇宙中物质均匀分布的假设，那么我们可以用透镜效应，即光学意义上的“像差”来解释膨胀的加速。法国物理学家洛朗·诺塔尔（1952— ）提出的相对论理论不必假设暗能量的存在就可以解决这个问题。于是，我们不再需要寻找罪魁祸首了。宇宙找回了一点自己的色彩。诗人雅克·利达（1929— ）在他的一首美妙的科学诗歌的末尾写道：

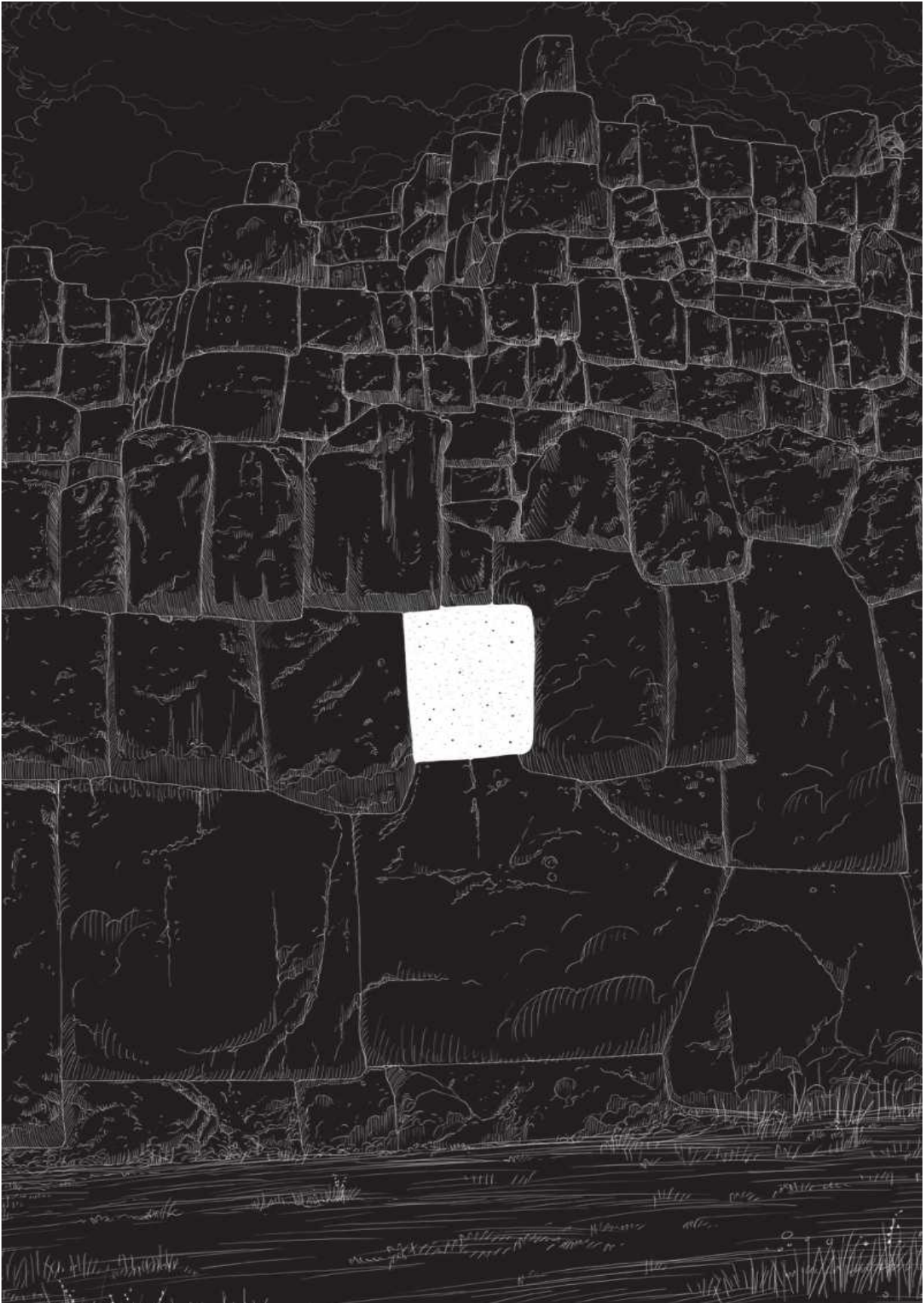
然后呢？宇宙逃亡了吗？

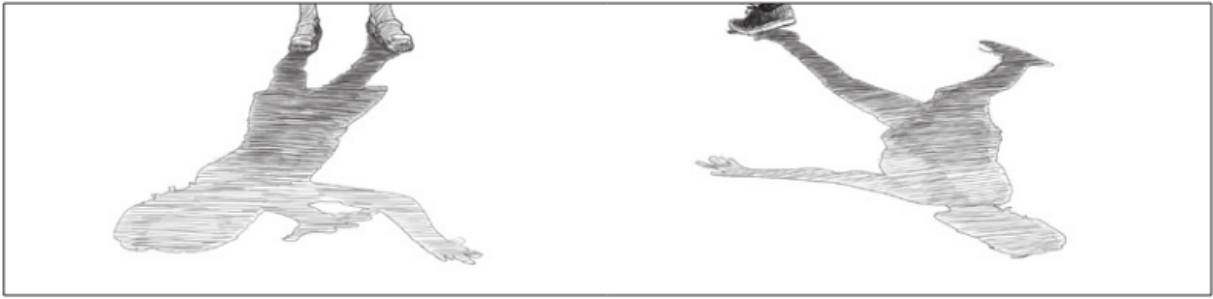
它在躲什么？会逃去哪里？

怎样的永恒的祸患？怎样的胜利的结果？

坚定地说，它就在这儿，法则以外。

暗能量，应该被染成粉色。





结语 黑色的统治

在我们对黑概念研究的最后，我们学到了什么？首先，好像这个对话让这些论说更加清楚明白。哲学家的关注点在于形而上的，甚至是陈旧的顾虑，或者在于艺术和思想史中出现的一些细微差异，并提醒物理学家在翻译概念时对于词汇的选用要格外谨慎，同时纠正那些有悖严格推理的含糊表达，或者要求我们更加勇敢、更有诗意地了解科学思想的独特之处。哲学家将关于起因的认知编制为隐喻，物理学家觉得哲学家的建议非常有必要。

我们惊讶于概念和图像之间的各种回响，它们的衔接中没有绝对的规则。将它们写在一起，我们发现了一种距离的艺术。只有这个既凭直觉的又能精确计算差距的研究才能使科学与想象之间的类比产生共鸣以及不协调。这个差距是可变的：认识论的线和“精神分析”的线很少是平行的，它们更像是欧几里得的短程线；它们会在接近自己的目标时发生扭曲；通常情况下，它们会伸展、延伸；有时它们交织在共同的惊叹中，或是讽刺般地出现分歧。然而，这些纵横交错并不是任意的。这个对话开启了一种写作，在我们看来，这种写作超出了普通的模式练习。

黑色的渐变表现出一种渐进，这种渐进具有一个意义：从我们所熟悉的夜空的黑色到最神秘的黑色，能够解释宇宙膨胀加速的未知能量的黑色，对黑概念的回顾是一段历史性的旅程。这个回顾告诉我们关于给它命名的科学实践的演变（我们也可以说是关于给它“定性”，因为它是一个形容词）。与我们有时所听到的相反，科学语言独立于普通语言之外，是建立在惯例的基础上的，这一事实并不意味着这些概念是中立的，或是对于理解这些概念来说是微不足道的。相反，对这些词语的选择非常重要，是科学工作不可或缺的部分。同样明显的是，这些关于命名的实践在科学史中发生了相当大的变化，特别是近几十年来的加速发展。与此同时，关于它们的不可改变性也出现了深刻的改变。

对夜空的黑色的解释是一个可能早就引起古代天文学家猜测的问题。在过去的几个世纪中，这个谜题的答案随着知识和技术进步的节奏发生了变化。“黑色夜空的问题”这个短语本身是比较近期才出现的，这个叫法已经失去了神秘的色彩。然而，在日常观察的显而易见以及对普通语言的借用背后隐藏着一个棘手的问题，以及对一个透明黑色的单一定义。这是关于意义缓慢的历史积淀的例子。

“黑体”这个短语经历的情况则不同，它体现了一个完全不同的时间性。1860年，古斯塔夫·基尔霍夫在有了关于“黑体”的认知的同时就创造了这个短语。他用一种类比的手法将研究对象命名为“黑体”：一个完全是黑色的物体是一个理想的吸收体（因此也是理想的发射体）。于是它从根本上改变了这个形容词的意义，来满足科学语言的精确性要求。这个黑色的产生是瞬间的，并与它表明的理论模式紧密联系在一起。因此，它也与它提出的问题相联系，并且在不到半个世纪的时间里，就引起了一场科学革命，也就是量子力学，一场近年来为大众所熟知的思想认知的巨大震荡。通过研究它与当代艺术带来的冲击之间的共鸣，我们想要强调指出这场发生在20世纪的思想变化的突然加速。

“黑洞”这个词的出现和传播标志着一个命名实践的变化、一个创新。这个概念的由来相对比较古老，很长一段时间以来，人们关注的只是封闭的恒星，后来是“史瓦西天体”。事实上，它甚至只在科学界的很小的范围内引起过讨论。尽管这个封闭的星体拥有着古老的魅力，但它并没有引起大众的兴趣。“黑洞”这个词，很难确定是谁第一个使用它的。但是在1967年，约翰·惠勒选择用它来重新命名这个之前就存在的思想，他刻意进行了一个秘密的营销操作：一种语义设计。他创造了一种旨在强调一个概念的表达方式，他从概念的理论意义出发，同时利用了虚构的突出性。这个方法获得了奇迹般的成功：他的同事们将注意力集中在了黑洞上，科幻小说中出现了黑洞的主题，日常语言和普通文化也出现黑洞的渗透。

由于20世纪下半叶科学研究成为一个竞争激烈的领域，这种有效的语言设计的方法成为一种战略的必要性：只有一个巨大的发现是不够的，还要给这个发现取一个引人关注的名字，来保证它在研究领域，甚至研究领域之外的影响。从这个角度来看，我们必须分析著名的暗物质和暗能量的出现。

通过这些著名的概念，我们在命名方法的演变中闯过了一个难关：我们要做的不再是尽快地利用一个发现，而是提前利用一个假设所带来的收益，即未来发现的成功前景。因此这个表达有助于为学界带来一个并不一定被所有人接受的想法：一些科学家将这些与黑有关的概念描述成现实，它们的黑只是意味着这些物质无法被观察到而已；而另一些科学家将这些概念看作思考的气泡，在面对它们时始终保持谨慎的态度。记者肖恩·卡里尼基曾说：“在科学世界中有一种有趣的用法，当你无法解释或描述某个东西时，在常用的单词之前加‘黑’或‘暗’，就成为一种完全正确的表达。”（《技术解密》，2012年6月20日）下面这幅漫画揭示了目前研究中过度的竞争所造成的问题：它会导致对命名仓促的、具有欺骗性的一种使用，而不是对概念的含义做耐心而忠实的解释。



图10.比尔·沃特森，《永远的卡尔文和霍布斯，第四册，1992—1995》，安德鲁斯·麦克米尔出版社，2012年，49页（第二条）。

我们可以举出关于这种偏差的其他例子，只限于关于黑概念的例子：形容词“黑色的”特别适合这些炫耀语义设计的做法，这可能体现了社会的一种需求。过去，黑色并不像现在这般有吸引力，即便它指的是想象中的迷人的元素，它在过去总带着一些与不良思想相关的联想。在文化中，黑色曾是被谴责的对象。而在现代，黑色成为主宰，黑色被高估，被过度使用，这尤其表现在服装设计中：“设计当中的黑色既不是几个世纪前的王族的豪华的黑色，也不是大工业城市里肮脏的悲惨的黑色，它是一种既朴素又精致，既高雅又实用，既欢乐又明亮的黑色，总之它是一种现代黑色。黑色是时髦的、有创造性的、严肃的，并且具有主导地位的。”（巴斯图罗，《黑色》，189页）黑色既象征着美丽与高雅，又象征着端正和朴素。

我们要强调关于术语“暗物质”和“暗能量”的一个更令人不安的事实：在法语中，这两个术语并不存在。在英语——这个在科学讨论中

占据主要地位的语言里，形容词“黑色的”（black）并不适用于这些概念：盎格鲁-撒克逊人更愿意研究的是“昏暗的物质”（dark matter）和“昏暗的能量”（dark energy），德语也是如此：dunkle materie, dunkle energie。对于一位意大利研究者来说，他研究的是“模糊的物质”（materia oscura）和“模糊的能量”（energia oscura）。因此法语的语言特殊性显而易见：法语是唯一将这些概念“黑化”的。为了完全正确地表达，这些术语有时与“昏暗的物质”和“昏暗的能量”共存。因此我们有时通过“昏暗的物质”这种表达来描述那种难以被探测但被猜想为传统属性的物质，“暗物质”这个表达则用于描述完全外来的物质。然而，基本上还是与“黑暗”有关的术语在很大程度上占据着主导地位，似乎坚持使用包含“昏暗的”术语的研究人员正是对这些概念持怀疑态度的那部分人。

这增加了我们思考在科学语言中黑色所传达的想象内涵的兴趣。黑概念的吸引力并不是某种偶然，而是这些思想会将黑色形象激发出来。将一个思想概念界定为“昏暗的”或“模糊的”，是为了明确指出探测的困难，同时也强调了我们为描绘这种现象特征所面对的理论尴尬。从这个意义上讲，加上“dark”这个形容词的确可以使这些思想更准确，因为这个形容词会让我们提高警惕。在莎士比亚的语言中，或者在我们的语言中，某种昏暗的东西，从喻义上讲，就是难以理解的东西，甚至是灾难性的东西（一个黑暗的故事）。由于这层含义，暗物质或暗能量似乎是一些有风险的不太明显的假设，我们无法对此表示毫无困惑或者怀疑的赞同。通过将“dark”翻译为“黑”，讲法语的研究人员已经深刻地改变了这个名称的含义。他们把它变得更极端，并利用了法语中“黑色”这个词的象征意义。

黑的，就绝对是昏暗的，是无法探测的。通过把昏暗变成黑暗的绝对化，新的命名排除了一切与昏暗的图像相关的内涵，也就是说，它隐藏在面对这些思想时势必会产生疑虑的迹象。物质的黑暗和暗能量的黑暗象征着一切被果断隐藏的事物，自相矛盾的是，这个黑色没有质疑这些假设，而是让我们更坚信它们的存在。在我们的想象中，黑色的存在比昏暗的存在更多。“实体化”创造了暗物质和暗能量，通过这种方式，缺失的质量和宇宙常数成为不容置疑的物质现实。于是科学家们给自己的思想套上了黑色的衣服，他们冒着一个风险，即他们可能会成功，也可能让黑色具有了另一种传统的价值，那便是丧服：“我们这个时代的人们穿的黑衣服是一个可怕的象征……人

类的理性推翻了所有幻想，也给自己穿上了丧服。”（阿尔弗雷德·德·缪塞，《世纪之子的忏悔》，1836年）

无论科学的进步给这些问题以怎样的回答，我们都相信历史认识论和精神分析理论提出的两个观点是相关的、互补的。它们让我们可以在面对复杂而棘手、困难而尖锐的问题时向后退一步，这些问题也总会牵扯到推理的严密性和不可避免的感性投入。将我们吸引到黑概念当中的，以及让这些黑概念弥足珍贵的，是代数和实验结构以及潜在丰富的想象符号所表征的错综复杂，正是这种错综复杂让它们如此富有魅力。因此我们需要更多的努力，使它们远离障碍，开展一个调整研究工作，并用一种批判和善意的眼光来看待它们。



[1] 亨利·米修（Henri Michaux，1899—1984），法国诗人、画家。其诗歌直接呈现个体的潜意识与神话原型，语言不再是表达或修饰的工具，而成为映射另一种维度存在的镜子。——译注（如无特殊标注，文中注释皆为译注。）

[2] 安德烈·弗朗坎（André Franquin，1924—1997），比利时著名漫画家。其代表作《黑思想》是一部黑色幽默连环画集。书中探究了抑郁和恐怖的幻想，并且图都是用黑白两色所画。

[3] 加斯东·巴什拉（Gaston Bachelard，1884—1962），法国哲学家、科学家、诗人，代表作《梦的诗学》《火的精神分析》《科学精神的形成》等。

[4] 勒内·巴雅维尔（René Barjavel，1911—1985），也译作赫内·巴赫札维勒。法国作家、记者、评论家，是首位提出时间旅行中祖父悖论的科幻作家。代表作有《冰人》《不小心的旅行者》等。

[5] 皮埃尔·勒韦迪（Pierre Reverdy，1889—1960），法国著名诗人、超现实主义诗歌的先驱之一。代表作有《椭圆形天窗》《屋顶上的石板》等。

[6] “险恶用心”法语译文为noirs desseins，直译为黑色的企图。

[7] 阿瑟·兰波（Jean Nicolas Arthur Rimbaud，1854—1891），19世纪法国著名诗人。早期象征主义诗歌的代表之一，开启了超现实主义诗歌流派。

[8] 布莱兹·帕斯卡（Blaise Pascal，1623—1662），法国数学家、物理学家、宗教哲学家。

[9] 埃拉托斯特尼（Eratosthenes，公元前276—前194），古希腊数学家、地理学家、历史学家、诗人、天文学家。他是最早有文字记载的计算出地球周长的人。

[10] 菲利普·葛洛克（Philippe Geluck，1954—），比利时漫画家，代表作《猫》。

[11] 滚石乐队，一支来自英国的摇滚乐队，成立于1962年，自成立以来一直延续着传统蓝调摇滚的路线。

[12] 阿那克萨哥拉（Anaxagoras，公元前500—前428），古希腊哲学家，原子唯物论的思想先驱。

[13] 皮埃尔·苏拉日（Pierre Soulages，1919— ），法国当代知名艺术家，作品善用黑色。

[14] 保罗·瓦勒里（Paul Valéry，1871—1945），法国诗人、散文家和哲学家。

[15] 米歇尔·卡斯（Michel Cassé，1943— ），法国天体物理学家、作家和诗人。主攻核合成和量子力学。

[16] 法语为“ergosphère”，这个词来自希腊语的“ergos”，意为工作。

[17] 夏尔·波德莱尔（Charles Baudelaire，1821—1867），法国19世纪最著名的现代派诗人，象征派诗歌先驱，代表作《恶之花》。

[18] 卡尔·古斯塔夫·荣格（Carl Gustav Jung，1875—1961），瑞士心理学家，分析心理学的创始人。

[19] 让·季奥诺（Jean Giono，1895—1970），法国作家，代表作《屋顶上的轻骑兵》《种树的男人》。

[20] Anima，也称女性意象，指男人潜意识中的女性性格，只有一个。

[21] Animus，也称男性意象，指女人潜意识中的男性性格，可有多

个。

[22] 约瑟夫·布罗茨基（Joseph Brodsky，1940—1996），俄裔美国诗人、散文家，诺贝尔文学奖获得者。代表作有《韵文与诗》《山丘》《诗集》。

[23] 威廉·詹姆斯（William James，1842—1910），美国心理学之父，美国本土第一位哲学家和心理学家。代表作《心理学原理》。

[24] 法语为franchir le Rubicon，卢比孔河位于意大利北部。公元前49年恺撒曾越过此河，同罗马执政官庞培决战。因此这里的意思是绝对采取果敢的行动，破釜沉舟。

[25] 法语中在表示喝和吃的动词boire和manger之前加上定冠词le，就将这两个动词名词化了。

[26] 希腊语daimon，在古希腊神话中它是一种介于神与人之间的精灵或妖魔。它们不具备人的外貌，而是一种善恶并存的超自然存在。

[27] 原文中使用的是拉丁片语primus inter pares，字面意思为“同僚中的首席”。



未读 Club

为读者提供有温度、有质量、有趣味的
泛阅读服务



专属社群 独家福利
精品共读 活动特权

手机扫码
加入未读 Club 会员计划

未读

全球畅销百万科普书

《给忙碌者的天体物理学》

——青少版——

全彩图文+趣味问答

UNREAD

给忙碌 青少年讲 天体 物理

ASTROPHYSICS
FOR YOUNG PEOPLE
IN A HURRY

霍金科学传播奖得主
写给孩子的
宇宙通识读物

功课再忙，
也要记得仰望星空

让孩子从小就拥有“宇宙视角”，
看得远、想得大

（英）尼尔·德格拉萨·泰森
（美）格里高利·夏内
著
加威译

卡尔·萨根传人、霍金科学传播奖得主
写给孩子的宇宙通识读物

北京天文馆前馆长 朱进
中国科学院国家天文台研究员 苟利军
北京市海淀区中关村第二小学副校长 沈耘
人大附中三义学校校长 寇奇
作序推荐

版权信息

给忙碌青少年讲天体物理：霍金科学传播奖得主写给孩子的宇宙通识读物

ASTROPHYSICS FOR YOUNG PEOPLE IN A HURRY

作者：[美] 尼尔·德格拉斯·泰森 格里高利·莫内

译者：阳曦

出品方：未读·探索家

出版社：天津科学技术出版社

Copyright 2019, 2017 by Neil deGrasse Tyson

First Edition published by W.W.Norton & Company, Inc.

Simplified Chinese translation copyright 2021 by United Sky

(Beijing) New Media Co., Ltd. ALL RIGHTS RESERVED



图中的碟状星系下方有一颗正在爆炸的明亮恒星，正是这样的星星帮助天文物理学家确定了一件事：宇宙膨胀的速度超出我们的预期。

目 录

[推荐序1](#)

[推荐序2](#)

[推荐序3](#)

[推荐序4](#)

[自序 为了观星而遛狗](#)

[1 有史以来最伟大的故事 宇宙大爆炸之初](#)

[2 如何与外星人聊天 通用的物理定律](#)

[3 帮超人找到母星 来自过去的光](#)

[4 不要随便去旅行 危险的星系际空间](#)

[5 看不见的奇怪朋友 神秘的暗物质](#)

[6 是爱因斯坦错了吗？ 宇宙常数与暗能量](#)

[7 小元素与大星球 元素周期表里的宇宙](#)

[8 完美主义者 世界为什么是圆的](#)

[9 假鼻子与望远镜 捕捉不可见光](#)

[10 拜访太阳系邻居 行星、彗星和卫星](#)

[11 外星人眼中的地球 生命存在的证据](#)

[12 在小蓝点上眺望 用宇宙视角看万物](#)

[名词表](#)

[索引](#)

[图片来源](#)

[返回总目录](#)



晴朗的夜空为你展示恒星、星际尘埃和拥挤的银河系的壮观景象，开阔你的眼界，让你的头脑更加开放。

推荐序1

翻开这本书，我有种熟悉的感觉，因为我和这本书的作者尼尔·泰森一样，也曾在天文馆为前来参观的朋友们讲述宇宙的故事。从古至今，人们对头上这片星空总有太多的“是什么”和“为什么”要问，正是这种好奇心推动着科学不断发展。

在过去二十年时间里，我常常与喜欢天文的小伙伴们在一起畅谈宇宙，在一双双为天文而着迷的眼睛中，我看到了当年的自己。正如这本书的书名提到的，青少年们是忙碌的，课堂和作业占据了他们生活的大部分时间，但我希望同学们在忙碌之余，不要忘了仰望星空，学会用宇宙视角看待世界万物。

在这本书中，作者用巧妙的比喻和生活中常见的例子向青少年们解释了宇宙大爆炸、物理定律、暗物质与暗能量等概念，也与大家一起猜想外星人的存在、一起到未知区域探险。作者在书中介绍了许多关于宇宙的基础知识，但并不枯燥难懂，在解答疑惑的同时又提出许多新奇的问题，让青少年对天体物理学怀有一颗探究之心。书中的精彩图片，有些来自世界上最先进的望远镜与最优秀的科学家，神秘动人的宇宙奇观，让我们可以暂时忘记自己身在地球，把思绪放飞到太空深处。

培养兴趣与热爱，激发好奇心，吸引更多有志的青年投身科学，正是我从事天文科普工作的初心。相信同为天文馆馆长的尼尔·泰森也与我有着同样的心情。在浩瀚无垠的宇宙面前，我好像也变回了那个好奇心永不满足的少年。地球之外，时间和空间都更加广袤，我相信

这本书能够成为探索未知的一个起点，期待青少年们能从此出发，向更美好的未来前行。

朱进
北京天文馆前馆长

推荐序2

一百多年前，梁启超先生在《少年中国说》一文中写道“少年强则国强”，这句话曾经激励了一代又一代青少年发愤图强、为国争光。青少年的身心发展极其迅速，在这个阶段，他们有着极强的好奇心，对世界和宇宙充满了各种疑问，同时也对知识有着极大需求。在这个阶段，做对一件事或者阅读一本合适的书可谓至关重要，甚至会影响终生。

本书作者尼尔·泰森在九岁时因为看了一场星空球幕电影而被深深震撼，从而立志要成为一名天体物理学家。我自己现在是一名天体物理学家，同样也是小时候对星空产生兴趣的缘故。读中小学的时候，我对星空特别感兴趣，不过遗憾的是，在当时我所处的二十世纪八十年代的西北小镇，相关的书籍极其有限，我对宇宙的兴趣只能通过《十万个为什么》以及偶尔在杂志上看到的信息来满足。即便如此，十几岁的我在听到国内也开设了天文专业的时候，还是当即立志探索宇宙奥秘。而如今，我如愿以偿。现在回想起来，尽管当时条件艰苦，无法给我提供很多支持，但是我的家庭并没有对我的兴趣进行过多限制，这使我能够自由地选择，并为我的兴趣在后来持续发展提供了很大的空间。

几年前，习近平总书记提出“科技创新、科学普及是实现创新发展的两翼”。如何培养科技人才？兴趣是最好的老师。但因好奇心而引发的兴趣也像小树苗一样珍贵而脆弱，需要悉心呵护。中国科普作家协会理事长周忠和院士最近在回答如何培养青少年对科学兴趣的时候也说：“要在尊重的基础上，进行价值引导，为他打开很多扇窗。”而阅读正是一种为青少年打开兴趣之窗的方式。

在最需要的时间碰到最合适的书堪称乐事。这本有关宇宙的书就是为青少年量身定制的一部作品。作者尼尔·泰森是美国自然博物馆海登天文馆馆长，也是继卡尔·萨根之后又一位深受大家喜爱的天体物理学家。每每去听他的讲座，人们都能够深切地感受到他对星空发自肺腑的热爱与热情。他使用了很多我们熟悉的事物去解释遥远的星空，让看似深邃的宇宙不再陌生，反而富有温情和诗意。正因如此，他写的《给忙碌者的天体物理学》（成人版）才让更多人对头顶的星空有了新的认识。青少年对世界的认知和成年人不尽相同，自然需要用不同的语言和方式来讲述。正是出于这样的考虑，这本畅销书又被改编成了面向青少年的科普读物，以青少年熟悉的视角和语言风格讲述宇宙中的趣事，还加入了很多插图以便同学们理解。

宇宙如此浩瀚，或许这本书就像一颗星，会点亮青少年探索未来的那盏明灯。

愿我们的少年拥有一个自由的心灵，愿他们的兴趣在好书的陪伴下茁壮成长。

苟利军

中国科学院国家天文台研究员

中国科学院大学教授

推荐序3

忙碌的小朋友们，你和遥远的星星有过对话吗？你曾想象接收外星人传递的信息吗？翻开这本书，你就仿佛打开探秘太空之门，走进了神奇的天体物理学世界。

天体物理学？！没被这高深的学科名称吓跑吧？你真了不起！更了不起的是这两位优秀的天文学家和科普作家，他们共同把听起来很复杂的天体物理学用简单的方式讲给你，让你对神秘莫测的宇宙产生无限遐想。

如果你是一个问号多多的小朋友，这本书会给你许多答案。你可能现在就会懂，也可能将来才会懂，不过好奇心将引领你不断去探究：

宇宙如何诞生？宇宙中都有什么？

我们的地球是蓝色的吗？地球上的元素来自哪里？

我们是谁？我们来自哪里？组成我们的物质是什么？

这些问题的答案从何而来？科学家是如何寻找证据的？

科学家对宇宙的研究经常陷入迷茫，毫无头绪，但他们热爱这种困境，乐于拥抱未知、探究未知，这让他们无比兴奋。你是不是也能感受到同样的兴奋呢？你有没有成为科学家、成为天体物理学家的冲动呢？

即使你很忙，也可以先放下手中的作业，放松心情，让这本书带给你全新的阅读体验：很多不懂的专业知识和概念都被用有趣的比喻来形容、用幽默的例子来解释，不知不觉中，你就在天体物理学走廊里进行了一次次时空穿梭。

翻开这本书，你就无法停下，每一章都让你对宇宙有更深一层的了解。你将跟随作者的脚步，先从宇宙的视角了解已知与未知；再回到地球，从地球的视角一步步探索宇宙。

宇宙大爆炸诞生的不只是物质，更重要的是普适的宇宙规律，这是我们了解宇宙的起点。而在地球上，我们要先认识自己的星球，再去认识其他的星球和星系。我们为什么要去认识宇宙？认识宇宙的基础是什么？宇宙中是否存在其他生命？这本书引导我们思考，给出解释，而更多的未知领域还有待你们去探索。

这本书中不少实例是作者从自身的经历引出的，他分享了很多自己儿时的想法和经历。他带着我们遨游在天体物理学的知识海洋，不断翻起好奇心的小浪花，也让我们的心胸和视野从个人的小世界扩展到整个地球、整个银河系、整个宇宙。读完这本书，愿所有的小读者都能获得尼尔·泰森所说的“宇宙视角”，心怀宇宙的气度，成长为志存高远的少年。

沈耘

北京市海淀区中关村第二小学副校长

推荐序4

记得在郭帆导演的工作室观看《流浪地球》样片的时候，我与一群科学家、作家和教师们坐在一起，从各自的视角解读这部电影，并畅想其教育价值。在电影中，人类已经奔向浩瀚宇宙；而现实里，对“星辰大海”的进一步探索还寄望于年轻一代的努力。作为一位中学老师，我深知在青少年阶段培养科学兴趣的重要性。

在物理教学中，我参与过很多次科普活动，最难忘的就是2013年6月担任“神舟十号—天宫一号”太空授课的地面课堂教师的经历。那一次与航天事业的全面接触也让我意识到，推动学生立志探索太空奥秘是一种使命。从那时起，我就有意识地在教学中加入航天、宇宙、科学和工程技术相结合的元素，希望学生们能够在有限的中学时代尽可能多地接触未知、开阔思维。要实现这一点，一种做法就是让学生更广泛地接触科普知识，将学生的思维从有限的教学内容中拓展出去。

身为老师，我有必要为学生精心准备适合的读物——有广度但不能冗长，有专业性但不能晦涩，有趣味性又要贴近课堂，这本《给忙碌青少年讲天体物理》是很好的选择。

作为一本科普读物，《给忙碌青少年讲天体物理》既能满足中学生课外阅读的需求，又与其他课外书有所不同。它是天体物理学的入门读物，但更像是一个成长的故事：一个对宇宙产生兴趣的孩子，长大后踏上科学之路，最后成为天文学专家。高深的概念在作者的娓娓道来中化繁为简，非常贴近青少年的认知基础；全书几乎没有物理公式，却能将一个个宇宙概念融会进青少年的心扉。此外，本书循序渐

进的写作风格和将抽象与实际相关联的教育理念也能给广大教育工作者以启发。

“热爱”是本书中多次出现的词语——热爱科学、热爱困境、热爱某个行星或元素，热爱科学的读者，一定会与作者产生共情。激发青少年对探索未知的热爱，以至对科学事业的热爱，是一本书推动青少年进步的最高境界。

相较于简单了解天体物理学的知识，作者更希望青少年能从宇宙视角看待万物、看待生命的价值，他以谦逊平和的语气倡导着包容和协同，这正是一种关爱全人类的命运共同体情怀。

总之，我希望青少年朋友们乐于翻开这本书并读完这本书，开卷有益，愿此书帮助你们打开探索宇宙、探索未知的大门！

宓奇
人大附中三亚学校校长

自序 为了观星而遛狗

9岁时，我决心要成为一名天体物理学家。直到今天，我仍记得那个夜晚。天上满是星星：北斗、木星、土星……一颗流星坠向地平线，我看到一团云一般的东西在空中移动。但那不是云，而是我们在宇宙中的居所——银河系，这片宇宙空间中充斥着千亿颗恒星。近一个小时的时间里，我一直好奇地仰望着这方星空的运动。

直到灯光重新亮起，我才意识到自己坐在美国自然博物馆的天文馆里。

我刚才看到的只是一场星空秀，但这丝毫没有减弱它的冲击力。那天晚上，我知道了自己长大后想做什么——一名天体物理学家。

那时候，我连“天体物理学”这个词都拼不出，但它其实是个相当简单的概念。天体物理学研究的是行星、恒星等天体，以及这些天体的运作和互动机制。

天体物理学家会研究黑洞，这些“怪物”能吞噬自身影响范围内的所有光和物质。我们也会在天空中寻找超新星的踪迹，那是垂死的恒星在爆炸时迸发的璀璨光芒。

我们是一群充满好奇心的怪人。对天体物理学家来说，一年意味着我们这颗行星绕着太阳转了一圈。如果你去参加天体物理学家的生日派对，那你很可能听到大家一起唱：

祝你绕太阳转圈快乐……

我们时刻不忘科学。最近，我的一位演员朋友半开玩笑地给我读了一段经典睡前故事——《晚安，月亮》（*Goodnight Moon*）。不需要科学家的讲解你也知道，奶牛不可能像书里那样跳过月亮。但天体物理学家可以告诉你要完成这项艰难的挑战需要满足的条件：如果这头奶牛对准月亮在3天后应该运行到的位置，然后以大约4万千米的时速奋力一跃，那它没准真有机会跳过月亮。

9岁的我对天体物理学没什么了解，我只是想了解自己在天文馆星空秀里看到的景象，以及真实的宇宙是不是真的那么迷人。起初，我和朋友一起带着他自制的双筒望远镜偷偷爬上自家公寓的天台研究星空；后来，为了给自己买个望远镜，我开始替人遛狗。狗有大有小，有的脾气糟糕，有的温和可亲，有的披着雨衣，还有的穿靴戴帽。为了看星星，这些狗我都遛过。

在那之后的岁月里，我用过的望远镜越来越大，观星的地点也从纽约的屋顶天台换成了南美的山巅，但始终不变的是我对了解宇宙的渴望，以及与尽可能多的人分享这份渴望的热忱。

比如说你。

我并不指望每位读者在读完本书之后都马上立志成为天体物理学家，但这本书也许会激发你的好奇心。如果你曾仰望夜空，暗自琢磨：这一切意味着什么？它有着怎样的运作机制？我在宇宙中居于何等地位？那么我推荐你继续往下读。《给忙碌青少年讲天体物理》会帮助你理解一些主要的概念和发现，科学家对宇宙的思考正仰赖这些基础知识。如果我成功了，你就可以在晚餐桌上让父母大吃一惊，可以给老师留下深刻印象。在晴朗的夜晚仰望星空时，你自己也将有更深的理解和感悟。

所以，让我们开始吧。我们可以从两个最大的谜团——暗物质和暗能量——开始，不过在此之前，不妨先阅读一下我心目中最伟大的故事——生命的故事。

尼尔·德格拉斯·泰森



20世纪，天文学家在这个旋涡星系里发现了8颗爆炸的恒星，因此它被命名为“焰火星系”。

1

有史以来最伟大的故事 宇宙大爆炸之初

起初，近140亿年前，整个宇宙比这个句子末尾的句号还小。

到底有多小呢？不妨把这个句号想象成一张比萨饼，然后再把这张比萨饼切成一万亿片。万事万物——包括组成你的身体、你窗外的树木或建筑、你朋友的袜子、矮牵牛花、你的学校、我们这颗地球上最高的山脉和最深的海洋、太阳系乃至其他遥远星系的粒子，宇宙中所有的空间、能量和物质都挤在这个点里。

而且它很烫。

环境如此酷热，又有这么多东西挤在这么小的空间里，宇宙能做的事只剩下一件。

那就是膨胀。

飞快地膨胀。

今天，我们将这个事件称为“大爆炸”，在亿万分之一秒（确切地说，是一千亿亿亿亿亿分之一秒）的时间内，宇宙急速膨胀。

对于宇宙生命在最初这个瞬间的事情，我们到底了解多少？不幸的是，非常少。今天我们知道，四种基本力控制着世间的一切，从行星的运行轨道，到组成我们身体的粒子。但在大爆炸之后的那个瞬间，这四种力仍纠缠在一起。

宇宙在膨胀中冷却。

这个瞬间被科学家称为“普朗克时期”，因德国物理学家马克斯·普朗克（Max Planck）而得名。在这个瞬间快要结束的时候，有一种力从混沌中挣脱出来。这种力将组成星系的恒星和行星聚集在一起，让地球围绕太阳旋转，也让10岁的小朋友没法灌篮——它便是引力。引力无处不在，我们可以通过一个简单的实验体验它：请合上这本书，把它举到离你最近的桌面上方几厘米的位置，然后放手。接下来，你看到的便是引力造成的结果。（要是你的书没往下掉，请立即联系离你最近的物理学家，告诉他宇宙出了大麻烦）

不过，在早期宇宙最初的短暂瞬间，行星、书本和10岁的篮球运动员都不存在，所以引力也没处施展身手。引力最擅长操控庞大的物体，然而早期宇宙里的一切都小得超乎想象。

但这只是开始。

宇宙继续膨胀。

接下来，自然界中另外三种主要的力彼此分开。⁽¹⁾这些力的主要任务是控制充斥宇宙的粒子，或者说小块物质。

一旦这四种力完全分开，我们就拥有了搭建宇宙所需的工具。

你能在火星上灌篮吗？

我们不妨假设你真能去往火星，尽管这个任务并不简单；你还有一套足够宽松的宇航服，能让你自由地跳起来。特定行星或卫星的引力强度取决于它的质量。火星比地球轻，因此它的引力相当于地球的 $\frac{1}{3}$ ，所以你的确有可能跳得足够高。不过，要是有一天你真的去了火星，我希望你不要浪费时间去打篮球，大把更有趣的事情等着你去看、去做。



大爆炸万亿分之一秒后



宇宙依然难以想象地小而热，但里面开始挤满粒子。这时候的粒子有两种，它们分别叫作夸克——听起来和“马克”押韵——和轻子。夸克的性质十分古怪。你永远不可能抓到落单的夸克，它总是和附近的伙伴“勾肩搭背”。我敢打赌，你至少认识一位这样的朋友或者同学。夸克就像那些不愿落单的孩子，哪怕上厕所都得搭伴。

物质的众多名字

有人警告我说，向年轻读者介绍太多的名称和术语并不明智。所以我将努力克制列出宇宙中所有夸克类型的冲动——譬如上夸克、下夸克、奇夸克和粲夸克。但我还是觉得你应该了解一下夸克和轻子，整个可见的宇宙都由这些粒子组成，包括你在内。另外我还注意到，孩子们真能记住各种恐龙的复杂名字。当然，有的恐龙凶猛可怕，值得让人记住。不过我再强调一次，现在我们讨论的可是组成宇宙的东西！粒子也很迷人，尽管它们没有恐龙那么凶猛，但要是没有它们，那些恐龙根本就不会存在。

两个或两个以上的夸克被分开得越远，将它们束缚在一起的力就会变得越强——它们就像被某种看不见的微型橡皮筋绑在一起。但要是夸克被分开得足够远，橡皮筋就会绷断，储存的能量就会在断裂的两头分别创造出一个新的夸克，于是被分开的伙伴各自获得了一位新朋友。假如同样的事情发生在你们学校里那些“连体婴”身上，他们每个人都会一分为二。当然，对你们的老师来说，这将是个大麻烦。

而另一方面，轻子却是“独行侠”。将夸克束缚在一起的力对轻子不起作用，所以它们不会聚集成群。最有名的轻子是电子。

除了这些粒子以外，宇宙中还充斥着沸腾的能量，能量被裹在波状的小包裹里，这些光能量团叫光子。

事情从这里开始变得奇怪起来。

宇宙如此炽热，所以光子会不断转化成物质-反物质粒子对，这些粒子对又会相互碰撞，再次转化为光子。但出于某些神秘的原因，这种转化有十亿分之一的概率产生一个落单的物质粒子，没有反物质粒子与它配对。要是没有这些孤单的幸存者，宇宙中就不会有物质存在。这是件好事，因为我们都是由物质组成的。

我们的确存在，而且我们知道，随着时间的流逝，宇宙不断膨胀、冷却。在它膨胀得比我们的太阳系还大的过程中，它的温度也在迅速下降。虽然这时的宇宙还很热，但它已经降到了1万亿开氏度以下。



大爆炸百万分之一秒后



宇宙已经从句号的亿万分之一膨胀到了和我们的太阳系差不多大，也就是说，直径近3000亿千米。

反物质

宇宙中的主要粒子——包括我们刚刚介绍过的夸克和轻子——都有性质与它处处相反的双胞胎反粒子。以轻子家族中最著名的电子为例，电子拥有一个负电荷，而它的反粒子——正电子——则拥有一个正电荷。不过我们不太看得到反粒子，因为反粒子一旦形成就会立即去寻找它的双胞胎兄弟，它们的相见从来就没什么好结果。这对双胞胎会彼此湮灭，转化为爆发的能量。这个故事请见物理学家乔治·伽莫夫（George Gamow）的著作《物理世界奇遇记》（*The New World of Mr. Tompkins*）第三章。今天，科学家在大型实验中利用原子的碰撞来创造反物质粒子。我们跟踪空间中的高能碰撞来观察它们。不过要说最容易找到反物质的地方，可能还得数科幻作品。《星际迷航》（*Star Trek*）电视剧集和电影里那艘著名的“企业号”星舰就是靠反物质引擎驱动的，反物质也是漫画里的常客。

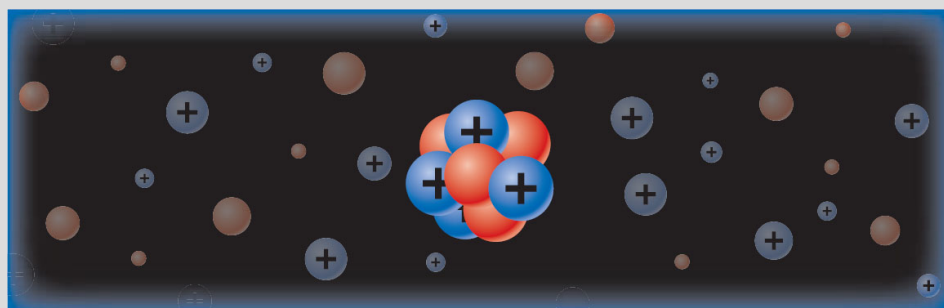
我们如何衡量温度

也许你已经学会测量温度，但要描述一个系统的温度，有几种不同的方式。美国人习惯用华氏度，欧洲和全球其他大部分地区则以摄氏度为标准。天体物理学家使用开氏温标，这套温标下的零度是绝对零度。任何东西都不可能比绝对零度更冷。0开氏度约等于-273.15摄氏度。我并不反感其他温标。日常生活中我乐于使用华氏度，但在思考宇宙的时候，我想到的肯定是开氏度。

1万亿开氏度，这个温度比太阳表面热得多，但比大爆炸之后的那个瞬间已经冷却了不少。这个温吞吞的宇宙温度和密度都不足以继续“烹制”夸克，所以夸克纷纷抓紧“舞伴”，创造出更重的粒子。它们的组合很快带来了我们更熟悉的物质形态，譬如质子和中子。

烹制宇宙物质的简单菜谱

1. 从夸克和轻子开始。
2. 组合夸克，形成质子和中子。
3. 将质子、中子和电子（一种带负电荷的轻子）组合成最早的原子。
4. 将这些原子混合在一起，制造出分子。
5. 将分子以各种不同的形式搭配组合在一起，制造出行星、矮牵牛花和人。



截至现在，大爆炸刚刚过去了**1秒**



宇宙的直径已经膨胀到了几光年，大约相当于太阳和离它最近的恒星之间的距离。温度降到了10亿开氏度。这还是很热，足以“烹制”小小的电子和它们的搭档——正电子。这两种粒子不断诞生，彼此

湮灭，然后消失。但电子和其他粒子都遵循同一条法则：它们有十亿分之一的概率幸存下来。

其余的则相互摧毁。

宇宙的温度降到了1亿开氏度以下，还是比太阳表面热。

四种基本力

控制宇宙的四种基本力如下。

1. 引力，这个你已经知道了。
2. 凝聚原子核内部粒子的强力。
3. 弱力能让原子破碎，从而释放出能量。但弱力不弱，它比引力强得多，只是没有强力那么强。
4. 电磁力将带负电的电子和原子核内带正电的质子束缚在一起。它还将原子束缚在一起，组成我们所说的分子。

不过简而言之：引力束缚大家伙，其他三种力则作用于小不点。

更大的粒子开始彼此聚合。组成我们今天能看见的宇宙——包括恒星和行星、你窗外的树木或建筑、你朋友的袜子、我的胡须——的原子所需的基本元素终于走到了一起。质子与中子、其他质子共同组成原子的核心，我们称之为“原子核”。



大爆炸已经过去了**2分钟**



正常情况下，宇宙中呼啸而过的电子会被质子和原子核吸引。电子带有一个负电荷，质子和原子核则携带正电荷，异性相吸。可这些粒子为什么会携带正电荷和负电荷呢？或者你还会问，异性为什么相吸呢？

它们就是这样。

我真想告诉你一个更好的答案，但宇宙没有义务为我们提供合理的解释。我只能说，这两个概念背后都有很多很多年的科学研究支持。

既然异性相吸，那么接下来你肯定觉得质子和电子会紧紧黏在一起。不过在接下来的几千年里，宇宙的温度还是太高，这些粒子根本无法安定下来。电子自由游荡，撞得质子东倒西歪，自由电子就爱干这事儿。

什么是电性？

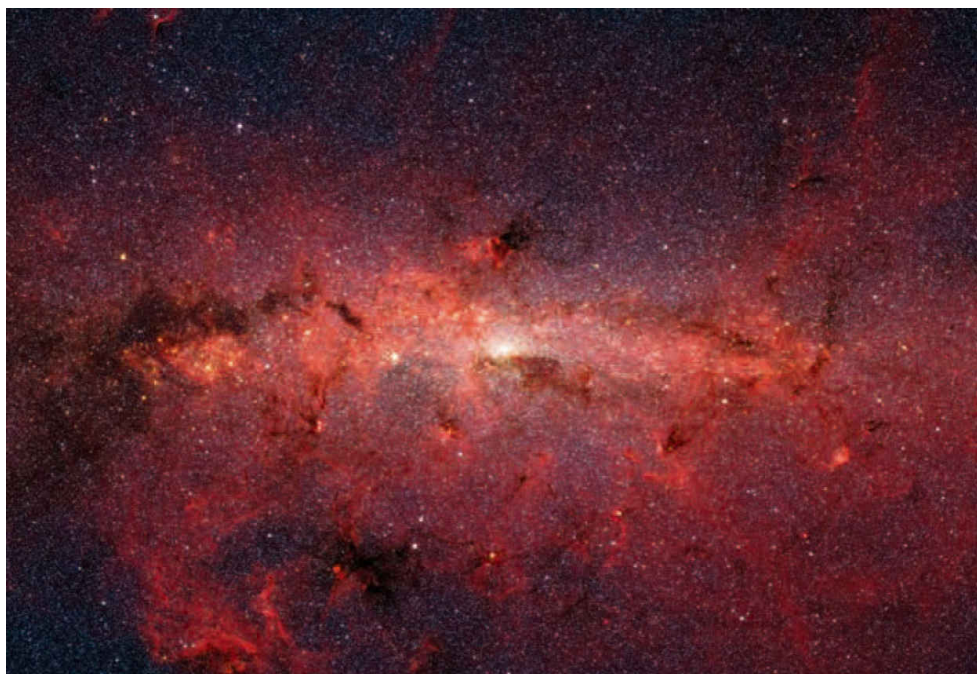
每个人都有不同的气质或特性。有人善良，有人慷慨，也有人不友善。这些特性能帮助我们定义自己。电性是物质的基本特性之一。有的粒子带正电，例如质子；有的带负电；还有一些完全不带电，譬如中子。拥有相同电性的两种粒子会互相排斥，电性相反的粒子——例如质子和电子——则会相互吸引。

宇宙温度降到3000开氏度（大约相当于太阳表面温度的一半）时，这样的局面就结束了，所有自由电子都和带正电的质子结合在了一起，它们结合产生的所有光子至今仍原封不动地在宇宙中穿行——直到今天，科学家仍能探测到这些光。我们将在第三章中进一步讨论这部分内容。



大爆炸之后38万年





这幅通过望远镜拍摄的画面让我们看到了银河系中心附近的数十万颗恒星。

宇宙继续膨胀，像一只不会爆炸的气球。膨胀过程中，宇宙逐渐冷却，引力开始起效。最开始的几十万年里，粒子到处乱跑，就像幼儿园操场上的小朋友。然后引力将这些碎片凝聚起来，形成宇宙中的城市，我们称之为星系。

近一千亿个星系成形了。

每个星系拥有几千亿颗恒星。

这些恒星像高压锅一样，迫使微小的粒子聚合形成越来越大的元素。最大的恒星积聚了极高的热和压力，制造出铁这样的重元素。

巨型恒星内的元素如果一直停留在自己诞生的地方就没什么用处。但这些恒星并不稳定。它们会爆炸，将自己内部的物质抛洒出去。

宇宙诞生90亿年后，在宇宙中一个平凡星系的一块平凡区域里，一颗平凡的恒星诞生了，它便是太阳。

它是怎么形成的？引力慢慢聚集起一大片气体云，里面充斥着粒子和包含多余质子、中子的重元素。在这些粒子围绕彼此旋转的过程中，引力迫使它们不断靠近，最终发生碰撞，聚合在一起。

什么是元素？

宇宙中有118种已知的元素，每种只由一种原子组成。不同元素间的主要区别在于原子核包含的质子数不同。氢是宇宙中最常见的元素，它只拥有一个质子。将一个质子加到氢原子中，你就会得到一种新元素——氦。

太阳诞生之初，这团气体云里仍残留着足够多的宇宙原料，它提供的物质足以制造出几颗行星、几十万颗被称为小行星的太空岩石和几十亿颗彗星。甚至到了这一步都还有富余，剩下的垃圾到处晃荡，常常撞上其他天体。



从700千米的高度俯瞰地球，你就会明白为什么我们叫它蓝色星球。

这样的撞击能量惊人，足以熔化岩石行星的表面。

太阳系中左冲右撞的碎片越来越少，这样的撞击也逐渐减少，行星表面开始冷却。被我们称为地球的行星形成于太阳周围的“金发姑娘带”⁽²⁾。你还记得吧，童话里的金发姑娘不喜欢粥太烫或者太冷，她想要温度刚刚好。同样地，地球和太阳之间的距离也刚刚好。要是地球离太阳更近一点，海洋就会蒸发；而要是再远一些，海洋就会封冻。

无论是前者还是后者，我们所知的生命都不会演化出来，你也不会在这里读这本书。



现在宇宙已经90多亿岁了



组成我们这颗年轻炽热星球的岩石中蕴含的水被释放到空中。随着地球逐渐冷却，这些水以雨的形式坠落下来，渐渐形成海洋。在这些海洋里，简单的分子以我们尚未发现的某种方式组合在一起，形成生命。

人类是需氧生物。我们需要富含氧的空气。主宰早期海洋的是简单的厌氧菌，这些显微级生命不需要氧气也能存活。多亏了厌氧菌，它们能释放氧气，这些充盈在空气中的氧最终为我们人类提供了繁荣的基础。有了富含氧的新大气，越来越多的复杂生命形式得以兴起。

但生命是脆弱的。偶尔会有大型的彗星和小行星撞击地球，造成巨大的破坏。

6500万年前，一颗重达10万亿吨的小行星撞击了如今墨西哥的尤卡坦半岛。这块太空岩石在地球表面上撞出了一个180千米宽、20千米深的大坑。这次撞击，以及它扬起的尘埃和碎片，抹去了地球上的绝大部分生命，包括所有著名的大型恐龙。

灭绝——生物或生命形式的绝对终点。

这次大灾难让我们哺乳动物的祖先得以繁荣发展，而不是继续充当霸王龙的零食。这些哺乳动物中有一支脑袋特别大的，我们称之为灵长类，它们演化出了一个聪明得足以发明科学方法和工具甚至追寻宇宙起源和演化的物种——现代智人。

那便是我们。



大爆炸之前发生过什么？

天体物理学家也不知道。或者说，对于这个问题，我们最具创造性的答案几乎得不到实验科学的任何支持。换句话说，我们无法证明它们。面对这个问题，有人坚持认为，一切必然有个开始：某种强于其他所有力的力，某个万物源头。他们脑子里的这个源头当然就是上帝。

但是，也许宇宙早已存在，以某种我们尚未确认的方式——譬如说，有个不断创造出新宇宙的多重宇宙。会不会是这样呢？

或者宇宙是从虚无中突然诞生的？

又或者我们所知、所爱的一切不过是某个外星超级智慧物种创造出来的电脑游戏？

一般而言，这些问题满足不了任何人。但它们却能提醒我们，无知——而不是已知——才是研究型科学家的常态。聪明的年轻人往往不愿意说“我不知道”，但承认自己的无知是科学家必须面对的日常。如果有人相信自己无所不知，那他肯定没有寻找过宇宙中已知和未知之间的边界，更不曾被这边界绊倒过。

而在接下来的章节里，我希望带领你前往这条边界。

我们确切知道的是，宇宙有一个起点。

我们知道宇宙一直在演变。

我们还知道，你身体里的每一个原子都能追溯到大爆炸那一刻，追溯到50多亿年前将自己内部的物质洒遍星系的巨型恒星熔炉之中。

我们是被赋予生命的星尘。

宇宙赋予了我们探查它的力量——我们这才刚刚开始。

2

如何与外星人聊天 通用的物理定律

想象一下，假如我们降落在另一颗拥有发达外星文明的行星上，那些外星人可能跟我们一点儿都不像：它们没准长着三条腿，或者一条腿都没有；它们可能披着一身滑溜溜的紫色皮肤，看起来比裸鼹鼠还丑；又或者它们个个都是“舞”林高手。谁知道呢？我们唯一可以确信的是，它们的世界遵循的自然规律必然和我们的一样。

用科学术语来说，这就是物理定律的普适性。

如果你想跟这些外星人交谈，它们说的肯定不是英语、法语，也不可能是普通话。你也不知道对它们来说，握手到底是一种打招呼的友善举动，还是严重的羞辱。但只要它们的文明足够发达，它们就肯定懂得和我们一样的物理定律。不管这些外星人是高是矮，皮肤是不是滑溜溜，它们总知道引力是什么。所以你最好想办法利用科学的语言和它们交流，这样更容易成功。



定义并塑造了我们这个世界的科学规则适用于宇宙的每一个角落，从你家后院到火星地表，甚至更远。就连《星球大战》（*Star Wars*）系列电影里的故事也应该遵循这些规则，虽然它们发生在一个非常非常遥远的星系里，但即使是最遥远的星系，也是我们这个宇宙的一部分。

过去的科学家并不明白物理定律的普适性。直到1666年，一位名叫艾萨克·牛顿的先生写下了引力定律，这条定律可以算是某种描述引力作用机制的秘方；在那之前，谁都没有任何理由相信我们这里的科学规则同样适用于宇宙中的其他地方。地面的事归地面，天上——恒星和行星——的事归天上。

在我们的日常生活中，每个地方的规则可能各不相同。你也许可以穿着运动鞋在自家的房子或者公寓里乱跑，但要是你去拜访朋友，他可能要求你进门脱鞋，以免泥巴踩得到处都是。科学家们曾经认为宇宙也是这样。但牛顿发现，宇宙的运作机制并非如此。

同样一套规则适用于任何一个地方。



1665年，为了躲避一种名叫黑死病的致命传染病，人们纷纷逃离伦敦。艾萨克·牛顿爵士也加入了逃亡的人群，躲进了自家在林肯郡的乡间庄园。远离城市的牛顿得到了一点儿可供思考的闲暇。望着自家的果园，他开始好奇：是什么力量将熟透的苹果从树上拽了下来？为什么苹果总是径直坠向地面？到了1666年，在这个问题的启发下，他想出了引力定律。



牛顿理论的天才之处在于，他意识到引力不仅能将树上的苹果拽向草地，还能让月亮绕地球旋转。

牛顿引力定律指引着行星、小行星和彗星绕太阳运动。

正因为引力定律的存在，银河系里的数千亿颗恒星才不会四散到宇宙深处。



艾萨克·牛顿爵士意识到，引力不仅能将苹果从树上拽下来，还能让月亮绕地球旋转。

普适于全宇宙的不只是引力定律。自牛顿的时代以来，科学家们发现了其他许多同样适用于全宇宙的物理定律。物理定律的普适性帮助科学家做出了了不起的发现。我们可以研究遥远的恒星和行星，并假设它们遵循同样的规则。

继牛顿之后，19世纪的天文学家利用这一理念确定了组成太阳的元素就是他们在地球上研究的那些，包括氢、碳、氧、氮、钙和铁。他们甚至在阳光中发现了一种新元素的痕迹，所以这种新物质以希腊语中的“*helios*”（太阳）为名，它就是氦（Helium）。在元素周期表的大家族里，氦是第一种也是唯一一种在地球以外被发现的元素。多年以后，孩子们发现他们可以从气球里吸一口氦气，让自己的声音变得像卡通片里一样滑稽，从此生日派对和以前再也不一样了。



好吧，就算这些定律普遍适用于太阳系，那它们在银河系其他地方也同样管用吗？

整个宇宙呢？

一百万年甚至几十亿年前呢？

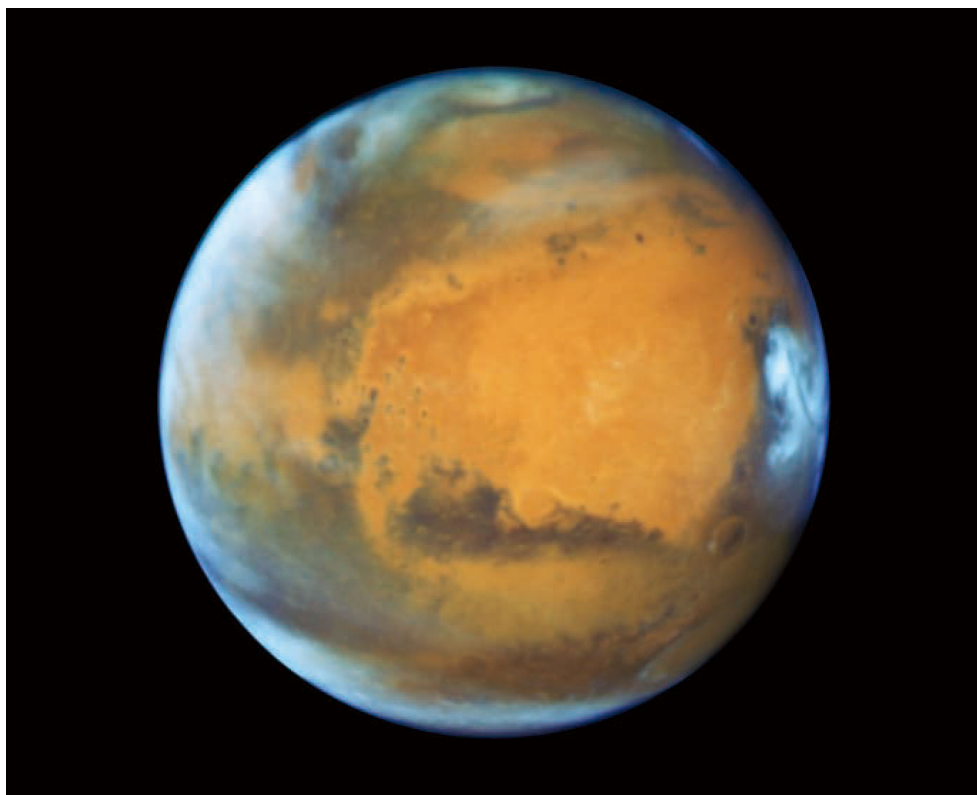
这些定律一步步地经受了考验。



如果引力将两颗强大的恒星拉到足够近的距离，就可能产生爆炸性的后果，正如艺术家在这幅图里表现的一样。

天文学家发现，附近的恒星同样由氢和碳之类常见的基本元素组成。后来在研究双星（像拳击场里的拳手一样相互绕圈的成对恒星）

的时候，天文学家再次发现了引力的影响。把牛顿的苹果从树上拽下来、让五年级学生无法灌篮的普适定律将这些成对的恒星束缚在一起，让科学家得以预测它们的运动。



来自火星的光在到达我们的望远镜之前必须穿过宇宙空间，所以实际上我们看到的是十几分钟前的火星。

所以这些定律不仅适用于我们这里，也同样适用于遥远的地方。可是谁知道它们是不是一直适用呢？100万年前，它们也同样有效吗？

答案是肯定的。我们之所以知道这一点，是因为天体物理学家能看到过去。

当你透过望远镜凝视火星的时候，你看到的并不是此刻的红色星球。地球和火星之间的距离一直在变化，但我们不妨认为，地火距离大致是2.2亿千米。这意味着光必须跑过2.2亿千米才能落到我们眼里，

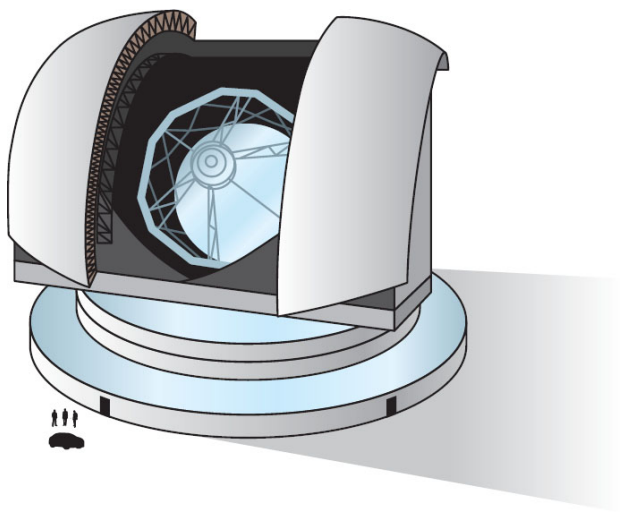
对光线来说，这段旅程大约需要12分钟。既然光需要12分钟才能到达你的望远镜，那么实际上你看到的是12分钟前的火星。

天体物理学家拥有的望远镜比你的大得多，所以我们才能研究比火星远得多的天体。我们朝宇宙中望得越远，看到的就是越久远的过去。

我知道你在想什么：哇哦！

是的，你的反应很对。

当我们谈到遥远恒星和星系与我们的距离时，通常用“光年”这个术语，或用一束光从特定天体到达我们的望远镜所需的时间来衡量。所以如果我们研究的是一个50亿光年外的星系，就意味着光需要50亿年的时间才能到达那里。



换句话说，我们此刻看到的是那个星系50亿年前的样子。

我们真真正正地回望着过去，而且我们发现，宇宙中最遥远的天体——它们已经有几十亿岁了——遵循的规则和我们今天观察到的完

全一样。环顾宇宙，那些普适性的定律从最开始就一直在勤恳运作。



当然，物理定律的普适性并不意味着发生在宇宙中的所有事情也同样会出现在地球上。宇宙中处处遵循同样的规则也不意味着任何事情在任何地方都有可能发生。比如说，我打赌你肯定没在大街上碰见过黑洞。

这些宇宙中的“怪物”是由密度极大的恒星在引力作用下坍缩而成的。引力将恒星内部的所有物质吸到它的最中心，在这颗恒星曾经闪耀的位置留下一个洞。黑洞周围的引力如此强大，就连光都无法逃脱。要是这样的宇宙洞穴真的出现在大街上，你肯定不是唯一的受害者。整颗行星都会被拽进黑洞的旋涡，消失不见。

不过，尽管黑洞如此强大，它们仍遵循同样的自然规则。



宇宙中处处适用的不仅是物理定律。这些定律还依赖于一些名叫“常数”的数字，它们能帮助科学家预测某条定律的影响。被称为“大G”的引力常数能帮助科学家计算特定情况下的引力强度。比如说，我们可以利用大G来估算火星地表的引力。

不过，在所有常数里面，光速是最著名的一个。执行阿波罗任务的宇航员大约需要3天时间才能飞到月球，但如果他们能达到光速，那么这趟40万千米的旅程只需要1秒出头就能完成。那他们为什么没有这样做呢？因为不可能。

截至目前，我们没有在任何实验中观察到任何形式的任何物体达到光速。

无论我们跑多快，也追不上一束光。

人类一直在实现各种不可能。我们常常低估了工程师和发明家的能力。有人断言我们永远无法飞翔，也有人坚称我们不可能抵达月球或者分裂原子。现在这三件事都已实现，但它们都没有违反既定的物理定律。

飞向月亮的确很难，但不是不可能。

“我们永远无法比一束光跑得快”的预言完全不一样。它出自经过时间考验的基本物理规则。宇宙里说不定贴满了光速限速标志，上面写着：

光速：

不仅是一个好主意，

更是一条法律。

无论外星人有多先进、多聪明，它们都没法超越光速，但它们可能更熟悉这些常数。我们对宇宙所有的科学研究、测量和观察表明，无论何时何地，那些主要的常数——从大G到光速——和依赖于它们的物理定律，从来就没有变过。



或许我有点儿太自信了。科学家不是无所不知的。还差得远呢。我们也不是对每件事都能达成共识。像兄弟姐妹一样，我们也常常吵架，只不过我们争执的焦点往往是大家不太理解的概念和宇宙事件。

一旦涉及普适的物理定律，争议必然十分简短。

但不是每个人都明白这一点。

几年前，我在加州帕萨迪纳市的甜品店里喝了一杯热可可，点单的时候当然是加了搅奶油的。但可可端上来的时候，我却没看到奶油的踪迹。我告诉服务生，我的可可没加奶油，他却一口咬定我看不见奶油是因为它沉到杯底去了。

但搅奶油的密度很低。它会漂浮在人类喝的任何饮料之上，当然也包括热可可。不管你身在宇宙中的什么地方，密度低的物质都会浮在密度更高的液体上。这是一条普适定律。

所以我为那位服务生提供了两种可能的解释：要么有人忘了给我的热可可加奶油，要么普适物理定律不适用于他家餐馆。他不服气地弄了一团搅奶油来，试图证明自己的说法。那团奶油在杯子里颠簸了一两下以后就浮到了液面上，安安稳稳地待在那里。

要证明物理定律的普适性，还有比这更好的证据吗？

3

帮超人找到母星 来自过去的光

我见过超人。我是在一卷漫画里见到他的，但感觉却十分真实。在这卷名叫《星光灿烂》（*Star Light, Star Bright*）的漫画里，拥有钢铁之躯的超人在假期里忙着在火星上击退一群外星侵略者。他把战场留给了正义联盟的伙伴，独自飞回地球，因为他想看一颗星星。

他正是我心目中的超级英雄。

如果你对超人不熟悉，那么我可以告诉你，他的皮肤能抵挡子弹，眼睛会发射激光，他不仅会飞，还拥有其他一些了不起的能力。不过更重要的是，他是一名外星人。他出生在一颗名叫氦星的行星上，在婴儿时期就乘坐一艘飞船来到了地球。结束了太空之旅的超人降落在堪萨斯的一片田野里，在这里，他遇到了自己的新父母——乔纳森·肯特和玛莎·肯特，从此开始了自己的生活。

不过，就在超人飞向地球的途中，氦星走向了毁灭。关于这段剧情，漫画和电影讲述的版本不尽相同，在《星光灿烂》里，氦星的太阳变成了超新星。这颗恒星的爆炸毁掉了超人的母星。

除了留着胡须、穿着我最爱的天文主题背心亲自出镜以外，我还为这卷漫画做出了另一个贡献：我指出了超人的家乡在现实的星系里可能的方位。漫画作者向我求助，经过一番小小的研究，我在乌鸦座（*Corvus*）挑了个好地方，离地球大约有27光年。再说一遍，这意味着光需要在宇宙中旅行27年才能到达地球。



这是恒星爆炸后的景象，它将自己内部的物质洒向星系的四面八方。

一言以蔽之，远。

超人第一次来到地球的时候，他的飞船速度比光还快。是的，这不可能，我们在上一章里说过。不过既然氪星人是高智慧的外星人，也许他们知道怎么制造虫洞，然后穿过它来旅行。这样，你就能抄近路前往宇宙中的任何地方。

超人来到了地球，但他母星的太阳爆炸释放的光只能以正常的速度穿过空间。超人在地球上成长，学习务农，背诵各州首府，发现自己的力量，与此同时，来自那颗爆炸恒星的光束仍在宇宙中穿行。

直到他长大成人，来到大都会——这座城市实际上是以我的家乡纽约为原型的——成为著名的钢铁之躯，那束光的旅途仍在继续。



我挑选了乌鸦座作为超人的家庭住址，因为它的光需要旅行27年才能让我们看到。这样一来，它在临终前释放的光芒就不会在超人长大成人之前到达地球。

直到他爱上露易丝·莱恩，那些光束还没有抵达地球。

直到他前往火星去击退入侵的外星人，那些光子终于靠近了地球。由于那颗恒星距离地球27光年，而超人母星的太阳在他出生后不久就爆炸了，所以等到那颗超新星迸发的光芒终于落到我们的望远镜里，超人正好27岁。

虫洞

引力能改变空间的形状，把直线变成曲线，这是阿尔伯特·爱因斯坦的伟大设想之一。不过，要是你把这个想法推向极致，引力就有可能弯曲整片宇宙空间，让两个相距遥远的地点变得触手可及。不妨把我们的宇宙简化成一张纸。如果你在纸的一角画一个地球，然后在对角画一个代表氮星的圆，那么两者之间最短的距离应该是一条直线，对吧？正常来说没错。但要是引力弯曲了这个平面的宇宙，也就是你把这张纸对折，让两颗行星近得几乎要重叠起来，两者之间的最短距离就变了。虫洞——爱因斯坦称之为“桥”——是宇宙中的某种隧道，它能将相距遥远的两个点连在一起。虽然我们不知道虫洞是否真实存在，也不知道你是否能乘坐飞船安全地穿过它，而不是身体里的每个原子都被撕开，但科幻作家就是热爱这个概念。

就在这时候，钢铁之躯冲进了海登天文馆。在故事里，漫画版的我让地球上所有最强大的望远镜指向乌鸦座，尽可能多地捕捉光线——无论是可见的还是不可见的。

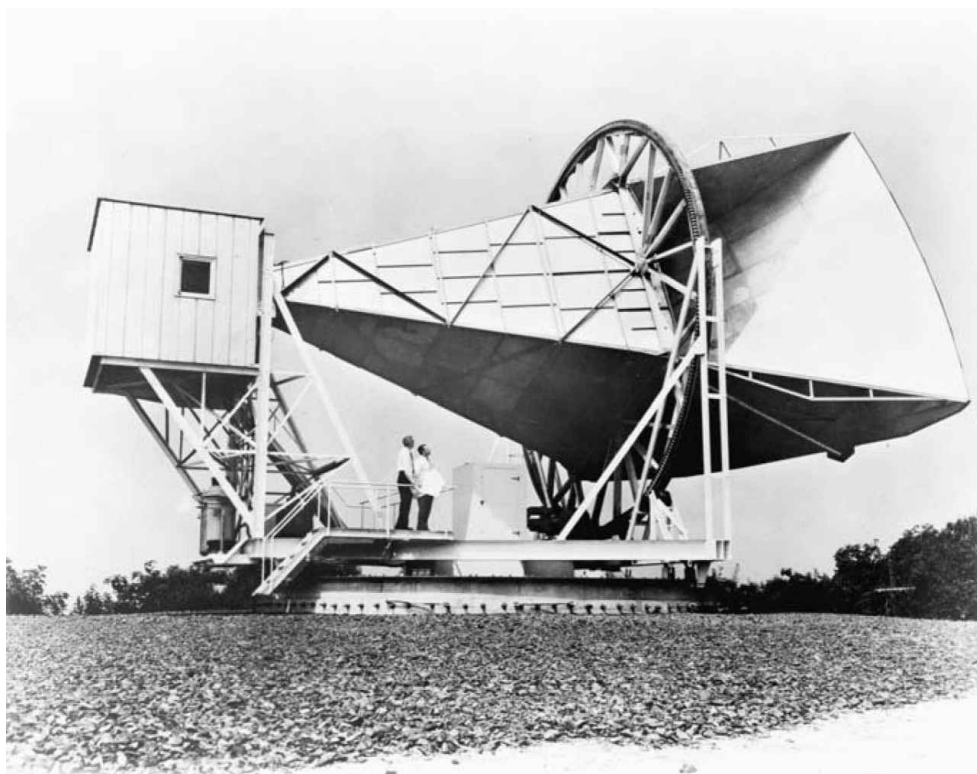
对那个大块头来说，这是一个十分悲伤的时刻。他终于亲眼看到自己的母星被超新星蒸发。这个例子完美地展示了天文物理学——甚至整个自然界——最奇怪的现象。这个知识点我们已经介绍过了，但它值得再说一遍。光需要时间才能从发源地传到望远镜里，所以当我

们看到某件东西时，当某个天体发出的光落入我们的眼睛时，我们实际上看到的是它过去的样子，也就是光子踏上旅程的那一刻。我们朝太空中望得越远，光行经的距离越长，落入我们眼中的过去就越久远。

对天体物理学家来说，像漫画里的超人和我一样回望27年前的过去是件稀松平常的事情。今天，我们的望远镜和探测器能让我们一窥几十亿年前的景象。我们几乎能看到宇宙最早的模样。关于这一点，我们应该感谢两位科学家，阿诺·彭齐亚斯（Arno Penzias）和罗伯特·威尔逊（Robert Wilson），他们无意间做出了20世纪最伟大的天体物理学发现之一。



1964年，彭齐亚斯和威尔逊就职于贝尔电话实验室，这是AT&T（美国电话电报公司）的研究部门，就是今天为我们提供无线和智能手机服务的那个公司。天空中充斥着各种各样的光能，有的是可见光，例如你熟悉的彩虹的颜色；有的则不可见。在后面的第九章里我们将详细介绍这方面内容。但它们都是波，对这些不同形式的光来说，波长，或者说一个波峰到下一个波峰的距离是它们的主要区别之一。AT&T修建了一个喇叭状的巨型天线来收发无线电波。



贝尔电话实验室的科学家利用这台天线研究宇宙的诞生。

彭齐亚斯和威尔逊将这台巨型天线指向天空，但无论他们将设备转到哪个方向，天线总能收到另一种形式的光——微波。今天，大部分美国人的厨房里都有微波炉，它利用这种不可见的低能长波来烹制或者加热食物。可是科学家为什么会在天空中发现这么多微波呢？

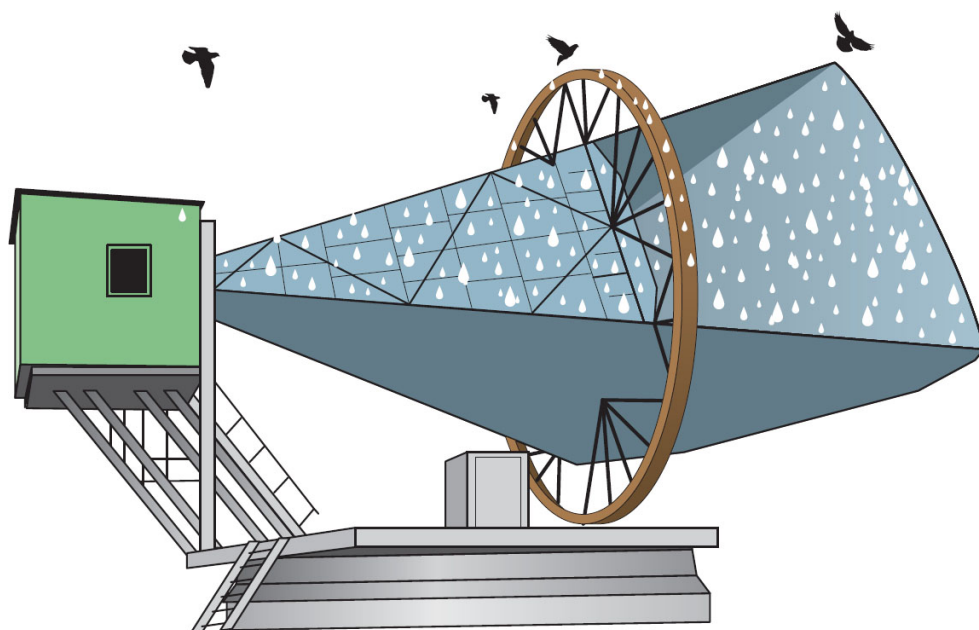
彭齐亚斯和威尔逊犯了难。

他们开始在地球上和天空中寻找微波的可能来源。几乎所有的光都找到了来源，只剩下一个来源不明的微波信号。无论他们将天线转到哪个方向，这个信号都如影随形。两位科学家自然开始怀疑，是不是他们的探测器出了问题。于是他们检查了天线内部，结果发现有鸽子在里面筑了巢，天线里还覆盖着一层白色的东西。

鸽粪。

鸽粪几乎覆盖了天线的整个“喇叭”，彭齐亚斯和威尔逊之所以会收到神秘的微波，可能只是因为天线脏了。他们清理了鸽粪，引导鸽子另寻新巢，然后重新测试了设备。

微波信号减弱了一点，但却没有完全消失，所以不能怪到鸽子头上。两位科学家仍无法解释他们收到的神秘光波。



与此同时，普林斯顿大学一个由罗伯特·迪克（Robert Dicke）领导的物理学家团队听说了他们的工作。不同于彭齐亚斯和威尔逊，他们很清楚这些奇怪的光来自哪里。

彭齐亚斯和威尔逊的问题跟鸽粪没关系。

他们发现的光来自早期宇宙。



大爆炸之后，宇宙急速膨胀。

正如我们已经讨论过的，宇宙中有许多神秘的规则，其中一条是：能量既无法被创造，也无法被毁灭。这就是能量守恒定律，你不能打破它。真的。今天我们这个宇宙中的所有能量早在大爆炸那一刻就已存在。随着宇宙的膨胀，所有的能量弥散到越来越大的空间中。每过去一秒，宇宙就会变得更大、更冷、更暗淡一点。

这个过程持续了38万年。

在这个早期阶段，你想看穿整个宇宙，那恐怕做不到。要完成这个任务，你需要看到来自宇宙对面的光子，但在那时候，光子跑不了太远。你是否有过这样的经历：你正想出门，却被爸爸或者妈妈拦在门口，要你去干某件没有完成的家务，或者去做被你忘得一干二净的作业。光子的遭遇跟你差不多。它们甚至还没踏上旅程，就一次次地被电子拦了回来。既然光子哪儿都去不了，那么你自然什么也看不见。宇宙的每个方向都是一团光雾。

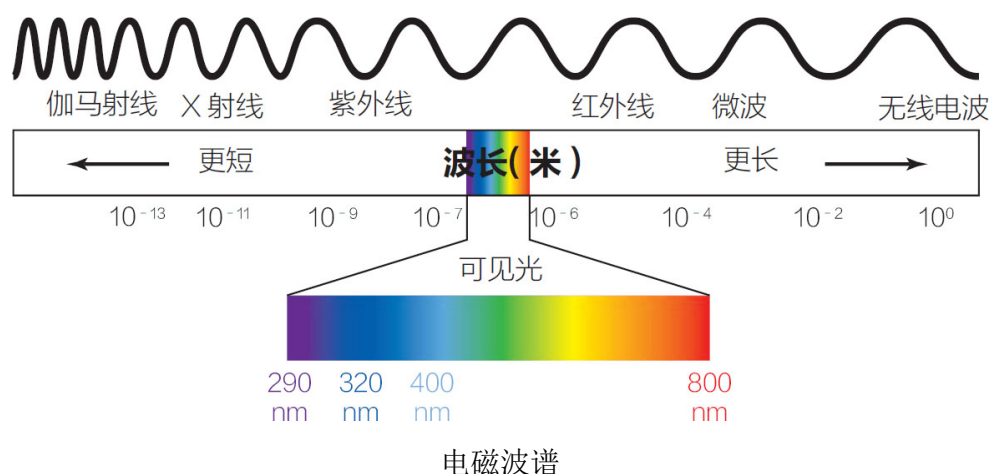
不过，随着温度的降低，粒子的运动速度变得越来越慢。电子的速度终于慢得足以被路过的质子捕获。只要电子和质子结合在一起，我们就有了原子。

不过这跟鸽粪又有什么关系呢？

现在，质子开始捕获电子，再也没有什么东西能阻挡光子了。它们可以在宇宙中畅通无阻地穿行。

光在宇宙中穿行时，宇宙继续膨胀冷却。光子变得越来越弱。起初，它们的能量高得足以被看见——你盯着纸质书或者电子书看的时候，眼睛捕捉到的就是这种类型的光子。在宇宙中穿行了亿万年后，

这些光子冷却下来。它们被拉长，变成了低能长波——微波。这些长途跋涉的光子共同组成了我们所说的“宇宙微波背景辐射”。



别被这个复杂的科学术语搞晕，也请你尽量不要去想象一台巨大的微波炉飘浮在宇宙中的画面。宇宙微波背景辐射是喧嚣混乱的早期宇宙留下的余光。

彭齐亚斯和威尔逊的大喇叭捕捉到的正是这些光。

两位科学家看到的是近140亿年前的宇宙。

乔治·伽莫夫

乔治·伽莫夫不仅是一位颇有影响力的宇宙学家，还是一名成功的老师。他的学生薇拉·鲁宾（Vera Rubin）后来对暗物质有了重要发现，这种神秘的物质将遥远的星系凝聚在一起。伽莫夫甚至为孩子们写书，他在一系列书籍中创造了一个名叫汤普金斯先生的角色，这位先生在科学世界里经历了各种各样的奇遇。有一次，汤普金斯先生变成了一个电子，而且和早期宇宙里的那些粒子一样，他也遇到了自己的反物质双胞胎兄弟——正电子——然后和对方一起湮灭了。真是个残酷的结局。

早在几十年前，生于俄罗斯的美国物理学家乔治·伽莫夫就预言过宇宙微波背景辐射的存在。一听说彭齐亚斯和威尔逊发现了奇怪的信号，迪克和他普林斯顿的同事们就意识到了它的真正意义，他们一直在寻找宇宙微波背景辐射存在的证据。所有东西都能对上号，包括信号来自天空中所有方向这一特性。

十多年后的1978年，宇宙微波背景辐射的发现为彭齐亚斯和威尔逊赢得了科学界的最高荣誉——诺贝尔奖。

这公平吗？

虽然罗伯特·迪克帮助彭齐亚斯和威尔逊解释了他们的望远镜收到的信号，但他却没有得奖，这看起来可能有点不公平，但诺贝尔奖通常颁给有重大发现的人。如果理论家——也就是解释观察结果的人——参与了发现的过程，或者告诉了别人应该去寻找什么，那他或者她也可能共同获奖。但在这个例子里，彭齐亚斯和威尔逊先发现了宇宙微波背景辐射，所以得奖的是他们。



我们怎么知道那真的是宇宙微波背景辐射呢？

我们不妨以外星人的视角去看。记住，光需要时间才能从宇宙中遥远的地方传到我们这里。望向深空的时候，我们看到的实际上是遥远的过去。所以，如果某个遥远星系里的智慧居民在那些光子奔向我们的望远镜之前测量宇宙微波背景辐射的温度，他们得到的结果应该比我们测出的温度略高一点，因为当时的他们生活在一个更年轻、更小、更热的宇宙里。

你完全可以验证这个设想。

暴露在微波中的氰分子会被激发。“激发”的意思是，氰分子的电子会跳到另一条绕原子核旋转的轨道上，不过要是你更愿意想象它们

是在跳舞，那也没问题。微波越暖和，氰分子被激发的程度就越高。天体物理学家比较了我们在银河系里观察到的氰和远方年轻星系里的氰。既然那些星系更年轻，那么那里的氰也就沐浴在更温暖的微波中，所以它们被激发的程度应该更高。这正是我们观察到的现象。

这样的事谁也编不出来。

我说的这些为什么很有趣呢？因为它们描绘了一幅关于宇宙如何形成的丰富图景。自彭齐亚斯和威尔逊之后，天体物理学家利用越来越灵敏的工具绘制了一幅详细的宇宙微波背景辐射地图。这张地图不太平滑，有的地方比平均水平热一点，有的地方则更冷一点。我们可以研究温差和地图中的起伏，借此描摹早期宇宙的模样，找到物质开始成团聚集的地方。我们能看到最早的星系是在什么时候、从哪里开始形成的。

宇宙微波背景辐射告诉我们，我们能理解宇宙运行、膨胀的机制；但与此同时，它也让我们明白，大部分的宇宙由我们尚不了解的东西组成。我们将在第五章和第六章中讨论这些谜团。

小心了，读者朋友们，我们的故事很快会变得黑暗起来。

4

不要随便去旅行 危险的星系际空间

九年级结束之后的那个暑假，我和一群孩子爬上一辆小货车，离开了纽约城。我们一口气坐了53个小时的车，来到南加州的莫哈韦沙漠（Mojave Desert），参加位于乌拉尼伯（Uraniborg）营地的夏令营。这个以丹麦天文学家第谷·布拉赫（Tycho Brahe，我们后面还会提到这位镶着铜鼻梁的了不起的观星者）的天文台命名的夏令营为期一个月，它为热爱科学的年轻人提供了远离城市的美妙机会。

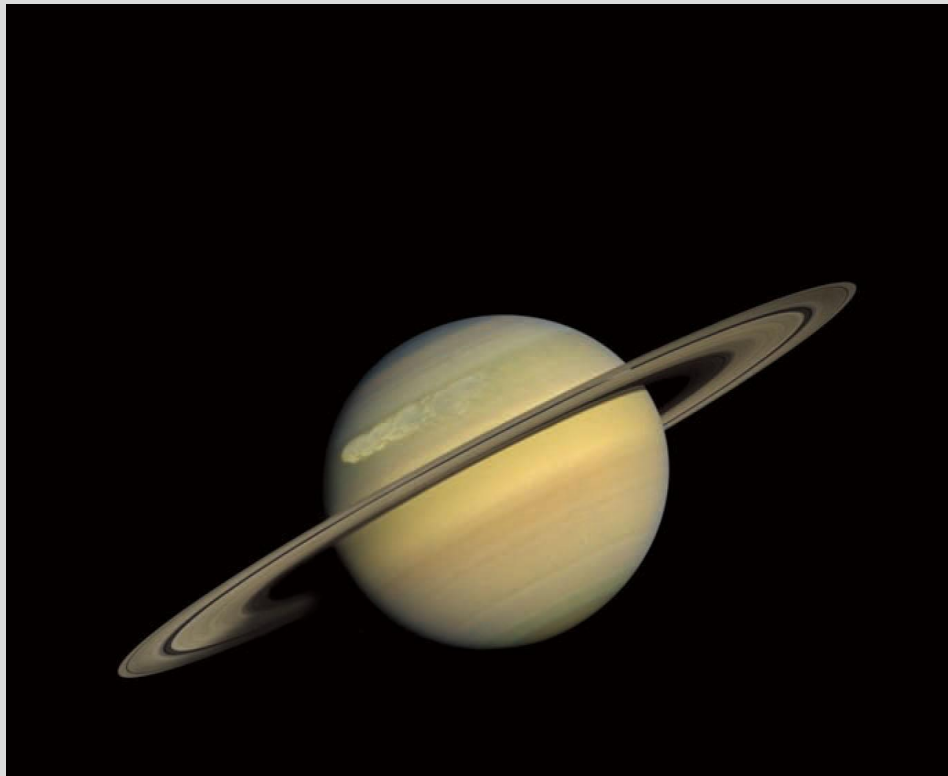
我以前也观察过天空。正如我之前提过的，晴朗的夜晚，我会爬到布朗克斯区（Bronx）自家公寓的天台上，眺望恒星和行星。这件事并不简单。我常常只能求妹妹帮我把望远镜的零件搬到楼顶，有几回还惹得邻居报了警，他们以为天台进了贼。

我们能在城市的天空中看见恒星，一般有十几颗，甚至可能上百颗。

莫哈韦沙漠让我看到了一个比城市里拥挤得多的宇宙。整个天空满是星星，感觉就像我看到的第一次星空秀，但这是真的。接下来的一个月里，我拍下了许多卫星、行星、恒星系统和星系的照片，但我看到的仍不是宇宙的全貌。可观测的宇宙，或者说宇宙中我们能看到的部分，可能包含了一千亿个星系。恒星组成的明亮璀璨的星系点缀着夜空，它们就在你面前，所以你很容易相信除了星系以外其他东西都不重要。但宇宙中仍有一些难以探测的东西存在于星系之间，这些东西可能比星系本身更有趣。

救命的土星

为了向警察证明我是一名少年天文学家而不是犯罪分子，我会邀请他们透过望远镜看看夜空。事实证明，土星总是很受欢迎。这颗行星不仅美得惊人，还多次帮我摆脱了被警察误抓的厄运。



真的，你怎么能不爱土星呢？看看这些环！这是太阳系里绝无仅有的奇观。

星系之间的黑暗区域组成了我们所说的“星系际空间”（intergalactic space）。假设你突然被传送到那里，你会慢慢被冻

死，或者窒息，你全身的血细胞也会爆开；你会昏迷，然后开始浑身肿胀，就像严重过敏的孩子一样——不过先别管这些。

这些危险都太普通了。

你还可能被名为“宇宙射线”的携带极高能量、飞速运动的带电亚原子粒子击中。我们既不知道它们来自哪里，也不知道是什么力量驱动了它们；但我们知道，这些粒子主要是质子，它们跑得几乎和光一样快。宇宙射线中的单个粒子携带的能量足以将放在果岭⁽³⁾任意位置的高尔夫球送进球洞。美国国家航空航天局（NASA）非常担心宇宙射线伤害宇航员，为了隔绝宇宙射线，他们为飞船设计了专门的屏障。



要是有一台合适的望远镜，你会看到天空中的银河就像一片厚厚的污渍，虽然不完全是牛奶的样子，但的确很像。

是的，无论现在或未来，星系际空间才是真正的舞台。



要是科学家没有先进的望远镜，我们可能一直以为星系间的区域十分空旷。明亮的恒星和奶渍般的星系主宰着夜空，也蕴藏着足够让天体物理学家忙碌几个世纪的秘密。

不过正如我们之前讨论过的，光的形式有很多种。我们都很熟悉可见光，但有的光是看不见的。医院里的医生利用X射线穿透你的皮肤，检查遭遇了意外的你有没有折断骨头，X射线就是一种光。来自遥远宇宙的微波也是一种光，它为我们提供了宇宙诞生的线索。就连无线网络所依赖的无线电波也是一种光，它是充斥世界的缤纷可见光的低能量远亲。

现代的检测和探测设备可以研究这些看不见的光。它们能告诉我们那些单凭肉眼无法看见的宇宙事件。利用这些探测器，我们探测了宇宙的乡野，发现了许多不可思议的怪事。

请允许我为你们介绍我最爱的几种。

矮星系

无论在太空中的哪个区域，每个大型星系都伴随着十几个小星系，我们把后者称为“矮星系”。我们的银河系附近就有几十个矮星系。正常的大型星系可能拥有几千亿颗恒星，但矮星系拥有的恒星说不定只有一百万颗。这个数字看起来可能很惊人，但由于矮星系包含的恒星更少，所以它们在天空中看起来要暗淡得多，你很难找到它们。

我们始终在发现新的矮星系。

你会发现，大部分（已知的）矮星系存在于较大的星系附近，像飞船一样绕后者旋转，最终被主星系撕裂吞噬。

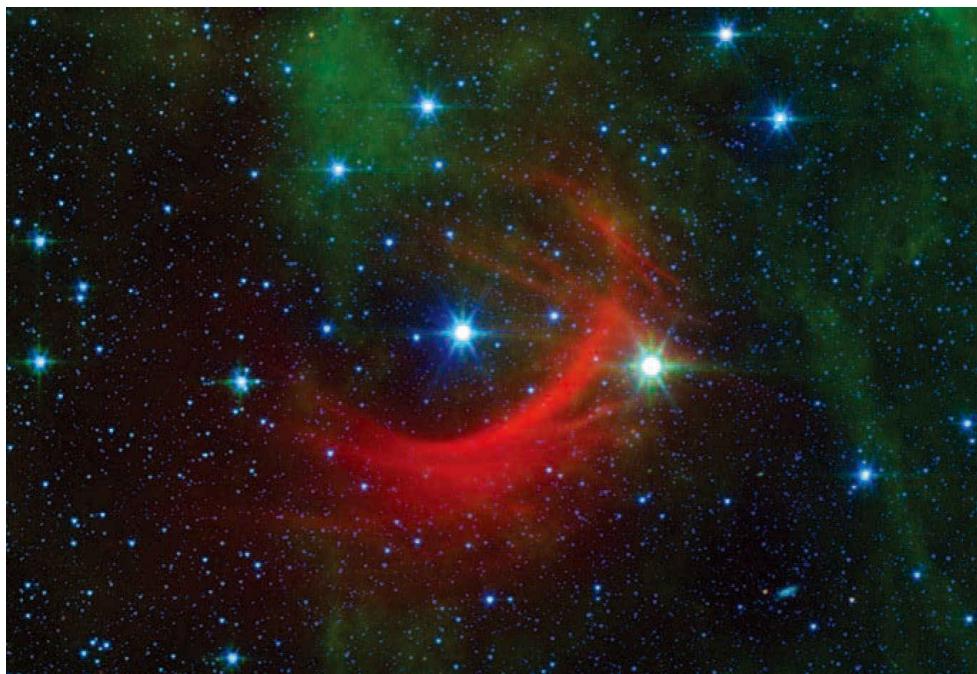


在这张照片中央的矮星系里，恒星依然组成了明亮的白斑。

过去十亿年里，银河系至少吞噬过一个矮星系。直到今天，我们仍能看见被吞噬的星系留下的残片绕着银河系中心旋转，这条恒星组成的“溪流”被称为“人马座矮星系”（Sagittarius Dwarf system）。考虑到它被如此野蛮地吞噬了，或许我们应该叫它“午餐”。

流浪恒星

星系会聚集形成星系团，就像邻近的城镇聚集组成城市群。不过我们的城镇一般会停留在原地，纽约不会沿着海岸旋转而上，撞向波士顿。然而，大型星系常常发生碰撞，然后留下一大片烂摊子。星系碰撞后，原本被引力束缚固定的上亿颗恒星会挣脱出来，在天空中四散逃逸。有的恒星会再次聚集成团，我们可以称之为矮星系。

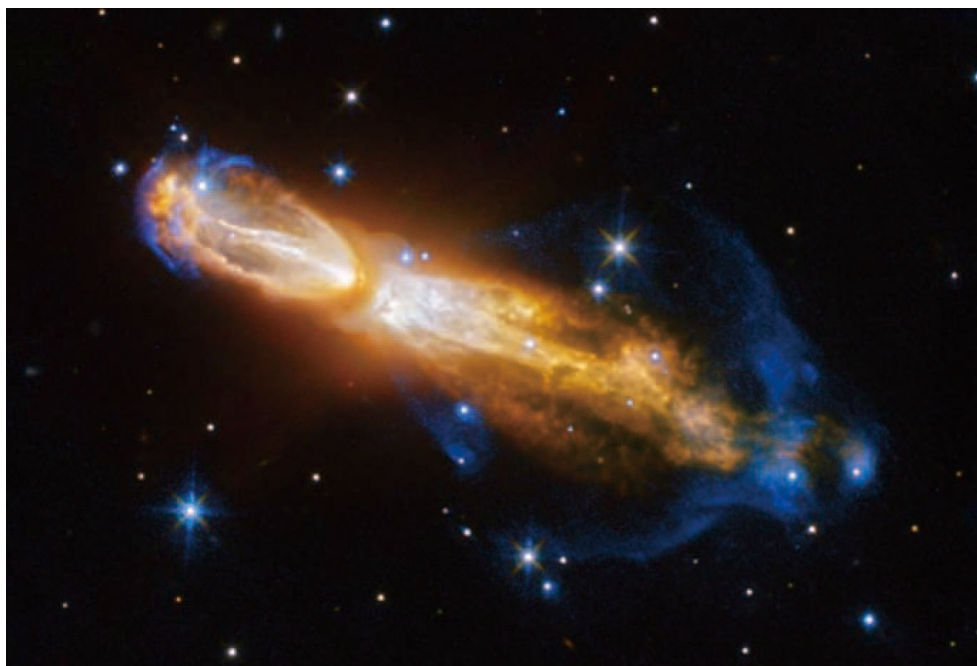


这颗巨型流浪恒星运动速度极快，甚至在自己的前方形成了一道激波——也就是图中的弧形红色条带。

另一些恒星漫无目的地漂流。我们的观察表明，天空中无家可归的恒星数量可能不少于栖息在星系内部同类。

爆炸的流浪恒星

超新星爆发是某些天体物理学家最爱的宇宙事件。恒星将自己炸成碎片，在这个过程中，它的亮度会骤然增加到原来的十亿倍，这种状态会持续几周。我们可以利用先进的望远镜观察宇宙彼端的超新星，它们通常出现在星系内部，但科学家已经在远离任何星系的区域发现了十几颗超新星。一般而言，每颗爆发的超新星附近都有几十万到上百万颗普通恒星，所以这些孤立的超新星可能暗示着宇宙中有很多我们看不见的恒星。



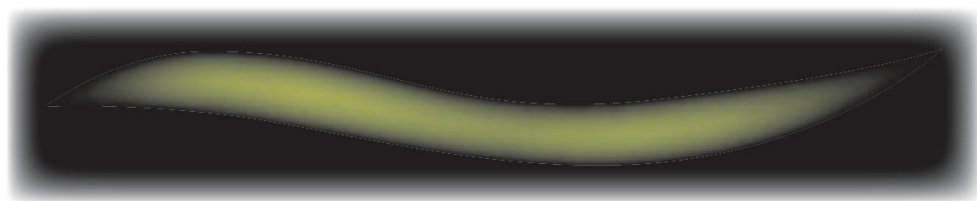
还有什么比流浪恒星更棒呢？那就是爆炸的流浪恒星！图中这颗爆炸的恒星正在向外喷发气体和尘埃。

那些没有爆炸也没有被发现的恒星可能有一些和我们的太阳差不多。

可能有行星围绕那些恒星旋转，行星上甚至可能有智慧生命。

上千万开氏度的气体

宇宙万物都由物质组成，一般而言，物质有三种形态：固态、液态和气态。水是最简单的例子：冰是固态的水；液态水清澈透明，可以饮用；当液态水转化为气态，水就会变成水蒸气。



有的望远镜让我们看到了星系间绵延的气体，温度高达几千万开氏度。虽然这些气体没有聚集成团，但它们依然是物质，而且很烫很烫。

星系从这些高温气体中穿过的时候，多余的物质会被剥落，就像学校餐厅里的恶霸抢走路人托盘里的巧克力饼干一样。高温气体的“恶行”不仅会毁了星系一天的好心情，还会让星系因失去了多余的物质而无法制造新的恒星。

暗蓝星系

除了主星系团以外，宇宙中还存在大量古老的星系。正如我们已经讨论过的，眺望宇宙约等于回溯时间。来自遥远星系的光可能需要几百万甚至几十亿年才能抵达我们这里。



在宇宙的年纪只有现在一半的时候，占据主宰地位的是那些中等大小的、特别暗淡的蓝色星系。暗蓝星系之所以难以探测，不仅因为它们距离遥远，还因为它们包含的亮星太少。这些暗蓝星系如今已不复存在。它们遭遇了什么？这是宇宙的未解之谜。难道它们包含的恒星全都燃烧尽了吗？它们是不是变成了无形的“尸体”，横亘在宇宙中？又或者，它们变成了我们今天看到的矮星系？还是它们全都被更大的星系吞噬了？

难道所有的暗蓝星系都变成了“午餐”？

我们不知道。

真空能量

真空不空。我们现在所说的真空跟你家的真空吸尘器没关系，而是指宇宙中不包含任何物质或能量的区域。但在这些本应空旷的空间中，海量的虚粒子仍时隐时现。虚粒子一旦相遇往往会互相摧毁，释放能量。这些微观的碰撞创造出了科学家所说的“真空能量”，这种向外的压力与引力抗衡，宇宙的膨胀可能正是由它驱动的。



大型星系之间有这么多东西，其中一部分可能遮挡我们的视线，让我们看不到后面的东西。对宇宙中那些最遥远的天体——例如类星体——来说，这可真是个麻烦。类星体是非常明亮的星系中心，用科学术语来说，它们是超高光度星系核。这些天体发出的光通常需要旅行几十亿年才能传到我们的望远镜里。

我们为什么讨厌真空

有一句老话说，自然界厌恶真空。众所周知，孩子们讨厌真空，狗也是。但他们讨厌的是家里的真空吸尘器。你对星系际空间的真空感觉如何？我估计你也不会太喜欢它。正如我们在本章之前的内容里详细介绍过的，真空可不是什么好地方。但我们并不知道自然界为什么讨厌真空，为什么孜孜不倦地坚持要填满真空，甚至为此做出很多奇怪的举动。自然界就是这样。





这幅艺术概念图中的类星体射出了一束穿越宇宙的能量。

类星体发出的光在穿过气体云和其他太空垃圾的时候会有一点变化，天体物理学家可以研究这些光，弄清它们在几十亿年的旅途中遭遇了什么。比如说，我们可以判断类星体的光是否穿过了不止一团气体云。每个已知的类星体——无论它处于天空中的哪个位置——都能告诉我们几十个散落在时空中的气体云的特征。

所以，就算看不见这些气体云，我们也知道它们在那里。

饥饿的星系、流浪恒星和超热气体的组合无疑让星系际空间显得十分有趣，再加上携带超高能量的带电粒子和神秘的真空能量，你甚至可以说，宇宙中的趣事都发生在星系之间，而不是星系内部。

但我不会建议你去星系际空间度假。你的旅途一开始可能会很有趣，但结局可能非常非常糟糕。

5

看不见的奇怪朋友 神秘的暗物质

几年前，我尚在学步的女儿在餐桌旁的儿童增高椅里做了个精彩的实验。在我的注视下，她小心翼翼地把自己盘子里二十来颗烧焦的豌豆扔到了地上。她每次只扔一颗，没有哪颗豌豆违反了普适的引力定律——它们都直接掉到了地上。

引力是一种了不起的力，但它也会带来麻烦。

牛顿和爱因斯坦解释了引力如何影响宇宙中的物质。无论是烧焦的豌豆、离开树枝的苹果、人、行星还是巨大的恒星——他们的理论适用于我们能看见、触摸、感觉、嗅探并偶尔品尝的一切物质。根据牛顿和爱因斯坦的理论，宇宙中的大部分物质不见了。但我说的“不见了”和你的袜子不见了完全不一样。

天体物理学家可以通过观察特定的恒星和星系测量宇宙中遥远区域的引力。通常来说，强引力附近肯定有一个或多个大型天体。比如说，巨型恒星或者黑洞周围的引力肯定很强。那要是一小块飘浮在宇宙中的太空岩石呢？它的引力就弱得多了。

有的引力场非常强，而周围可见物质的质量根本不可能产生这么强的引力，多年来，天体物理学家一直在追踪这些奇怪的强引力场。这么强的引力肯定有个源头，但我们却看不见它。不管它是什么，至少它不会和“我们的”物质或能量产生任何互动。近一个世纪来，我们

一直在等待某个人来告诉我们，为什么我们在宇宙中测量到的大部分引力——大约85%的引力——来自某种探测不到的东西。

我们对此毫无头绪。



这是科学界的一大谜团，对于这个“消失的质量”问题，今天的我们仍像1937年第一次发现它时那样毫无头绪。当时，一位长期在美国工作的瑞士天体物理学家弗里茨·兹威基（Fritz Zwicky）正在研究后发座星系团（Coma cluster）那一大片区域内的星系运动。宇宙中的这片区域距离地球十分遥远。从后发座星系团出发的一束光必须在宇宙中全速前进3亿年才能抵达我们的望远镜。

从远处看去，后发座星系团拥挤而明亮。一千多个星系乱哄哄地绕着星系团中心旋转，就像蜂巢里嗡嗡飞舞的蜂群。引力将星系团凝聚在一起，所以星系团内部的天体不会自己飘走。兹威基观察了这个系统内的几十个星系，利用它们来测量引力场的强度。

但事情有点不对劲。

这个引力场太强了，于是他把星系团内所有星系的质量全都加了起来。虽然后发座是宇宙中最大的星系团之一，但它的质量依然不足以产生这么强的引力，将其内部的所有星系凝聚在一起。

那里还有别的东西。



天体物理学家弗里茨·兹威基首次发现了后发座星系团中神秘的暗物质存在的证据。

某些他看不见的东西。

继兹威基之后，天体物理学家发现其他星系团也有同样的问题。这些“消失的质量”是天体物理学界最古老的未解之谜。

今天，我们为这些东西起了个名字——暗物质。

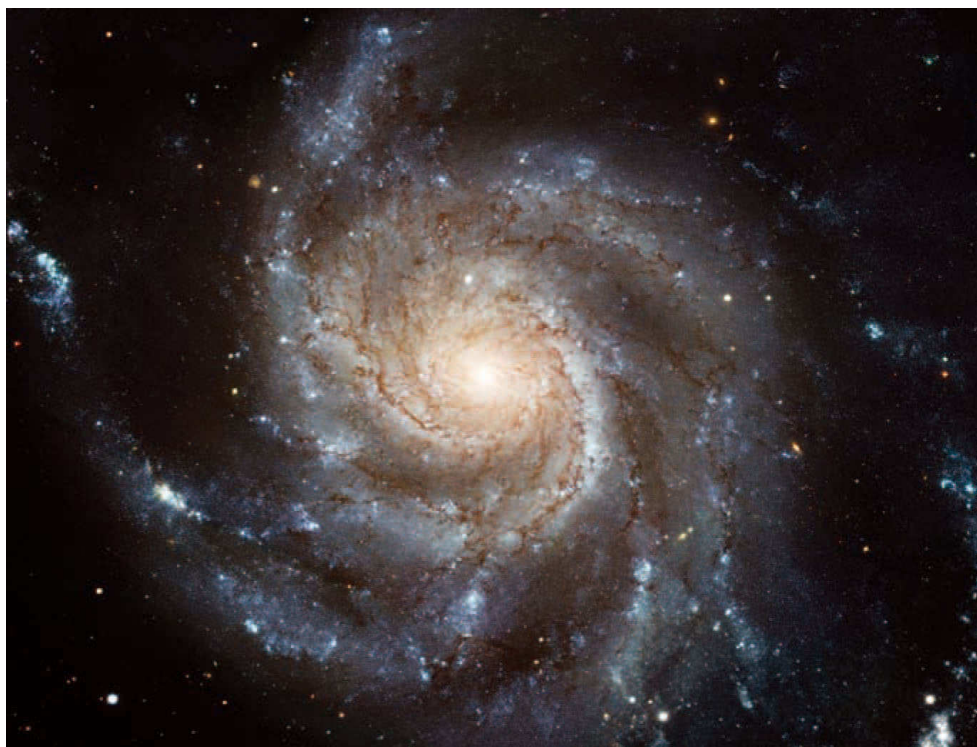


小时候，我住的公寓楼与另一栋公寓紧紧相邻，我的一位小学同学兼密友就住在那栋楼里。多亏了他，我才学会了下象棋、打扑克，还玩上了《战国风云》（*Risk*）和《大富翁》（*Monopoly*）桌游。更重要的是，他教会了我如何正确使用双筒望远镜，利用它来观察月球和星星。后来我的双筒望远镜换成了天文望远镜，观星的地点也从公寓天台换成了视野开阔的沙漠和海面，我爱上了那些散布在夜空中的奇观。

但天体物理学不仅关乎我们看到的東西，还关乎我们看不到的東西。

弗里茨·兹威基发现了星系团内部那些看不见的物质存在的证据。几十年后的1976年，华盛顿卡内基科学研究所的天体物理学家薇拉·鲁宾发现，那些消失的质量其实就藏在星系里面。当时她研究的是旋涡星系，这些扁平碟状的恒星群中央有个膨胀的明亮核心，外面则是几条恒星组成的向外伸展的旋臂。鲁宾跟踪记录了绕旋涡星系中心旋转的恒星的速度。刚开始的时候，她的观测结果完全符合预期。在引力的作用下，离星系中心越远的恒星运动速度越快。

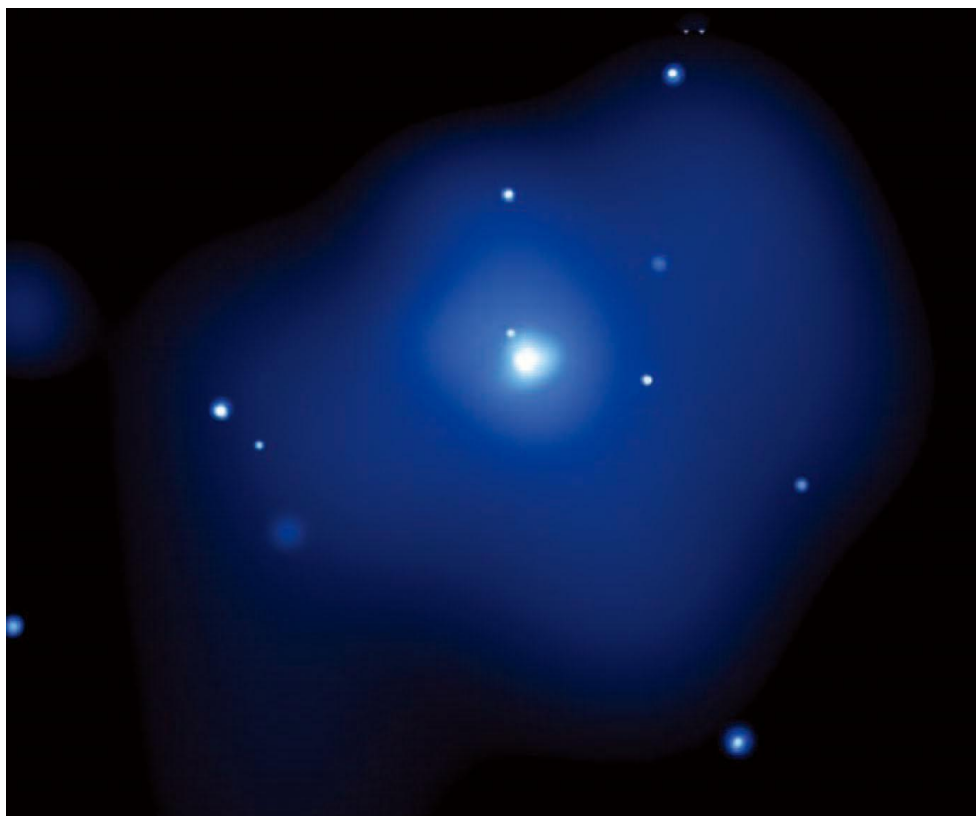
但鲁宾还观察了碟状结构以外的区域，那里有一些亮星和孤零零的气体云。由于这些天体与碟状结构边缘之间几乎没有可见的物质，它们和整个旋转星系之间的联系很弱，所以它们的速度应该随着距离的增加而衰减。可是不知道为什么，这些天体的运动速度实际上依然很快。



现在你理解我们为什么叫它旋涡星系了，对吧？这个旋涡星系可能拥有一万亿颗恒星。

鲁宾做出了正确的推理：这些遥远的区域里必然存在某种形式的暗物质，它们很好地隐藏在每个旋涡星系可见的边缘，紧紧束缚着遥远的天体。多亏了鲁宾的研究，现在我们将这些神秘区域命名为“暗物质晕”。

暗物质晕就存在于我们眼前，就在银河系这里。无论你观察的是哪个星系或星系团，可见物质的总质量和根据引力推算出的质量之间总是差别巨大。宇宙中的暗物质产生的引力大约是可见物质的6倍，换句话说，暗物质的质量是正常物质的6倍之多。



对暗物质晕（例如上图中这个）的研究让天体物理学家薇拉·鲁宾发现了“消失的质量”存在的更多证据。

暗物质侦探

孩提时的薇拉·鲁宾透过卧室的窗户看星星，后来她用硬纸筒做了自己的第一台望远镜。她很早就迷上了星空。大学毕业后，她申请去普林斯顿大学攻读天体物理学高级学位，校方却告诉她，这个专业不接收女生。但这没有阻挡薇拉·鲁宾的脚步。她去另一所大学拿到了学位，并通过对旋涡星系的研究证明了暗物质的确存在。很多人相信，鲁宾的研究应该获得诺贝尔奖。归根结底，科学界的这一最高荣誉是要颁给“发现”的，还有比暗物质更重大的发现吗？要知道，是这种神秘的物质将星系凝聚在了一起！



暗物质到底是什么？

我们知道它的成分肯定不是质子、中子之类的普通物质，还排除了黑洞和宇宙中的其他“怪胎”。也许暗物质只是小行星或者彗星？或者是不属于任何恒星系的自由行星？这些天体都拥有质量，但自身不发光，所以无法被我们的探测器发现。从这个角度来说，它们的确符合条件。但这类天体不可能有那么多，所以我们只能把自由行星也排除掉。

我们还知道，组成暗物质的不可能是组成行星、人类或汉堡包的那些粒子，因为它们遵循的规则似乎不太一样。在我们的世界里，将

粒子束缚在一起的力对暗物质不起作用，它们遵循的规则似乎只有一条，那就是引力。

也许暗物质根本就不是物质，而是一种我们尚未理解的引力。也许牛顿错了，爱因斯坦也错了。也许你，我的读者朋友，某天会在一辆路过苹果园的自动驾驶汽车里灵光一闪，领悟引力机制的真谛。可是现在，我们只能仰仗已有的知识进行推测。据我们所知，暗物质绝不是看不见的普通物质。

恰恰相反，它完全是另一种东西。



别担心。夜里蹑手蹑脚上厕所的时候，你绝不会一头撞上一团暗物质；穿过学校拥挤的大厅去上课的时候，你也不会被一堆暗物质绊倒。不过要是不小心摔了一跤，你大可以用这个借口来糊弄那些不懂科学的同学。暗物质存在于星系和星系团里。至于卫星和行星之类的小家伙儿，我们还没有观察到暗物质对它们有何影响。我们脚下的东西完全可以解释地球的引力。至少在地面上，牛顿是对的。

那么暗物质到底由什么组成？我们对它有什么了解？普通的物质组成了分子和大大小小的物体，从小小的沙粒到庞大的太空岩石。但暗物质却不是这样，不然的话，我们应该在宇宙中发现四处散落的暗物质团。

我们会发现暗物质彗星。

暗物质行星。

暗物质星系。

据我们所知，事实并非如此。可以确认的是，我们热爱的物质——恒星、行星和生命——只不过是庞大而黑暗的宇宙蛋糕表面那层薄薄的糖霜。



我们不知道暗物质是什么，但我们知道自己需要它。无论过去还是现在。

大爆炸之后的第一个50万年里（对140亿岁的宇宙来说，这不过是一眨眼的时间），宇宙中的物质已经开始聚集成松散的团块。这些物质团是星系团和超星系团的雏形。接下来的50万年里，宇宙的体积将膨胀一倍，此后还将继续膨胀。在这个膨胀过程中，有两种效应互相对抗。

引力努力将所有东西凝聚在一起。

而膨胀的宇宙努力将万物抛洒出去。

单靠普通物质产生的引力不可能赢得这场战斗，我们需要暗物质带来的额外引力。如果没有它，我们将生活在一个弥散的宇宙里，任何结构都不可能存在。

没有星系团。

没有星系。

没有恒星。

没有行星。

没有人。

如果没有暗物质，我们根本不会存在。



所以暗物质和我们亦敌亦友。我们完全不知道它到底是什么，这实在令人苦恼。但我们真的很需要它。科学家们从来就不会心甘情愿地仰仗我们不理解的概念，但在迫不得已的时候，我们也只能接受。科学有时候需要借助一些神秘的概念，暗物质并不是第一个。

比如说，19世纪的科学家测量了太阳输出的能量，也明白它对季节和气候的影响。他们知道，太阳为我们送来了温暖，也提供了生命所需的部分能量。但他们不知道太阳具体的运作机制，直到一位名叫玛格丽特·伯比奇（Margaret Burbidge）的女性和她的同事解开了这个谜题。在此之前，对科学家来说，太阳和暗物质一样神秘。有的科学家甚至提出，太阳实际上是一个燃烧的大煤球。

太阳为什么会发光

恒星（例如我们的太阳）的雏形是一大团气体云。在引力的作用下，气体云发生坍缩，它被压得越来越小，变得越来越烫。最后，有的气体云会停止坍缩，成为一大团发光的物质；但另一些气体云（例如太阳的雏形）太过巨大，足以触发热核聚变过程。气体云核心内的氢分子互相挤压，结合——或者说聚合——然后释放出能量。所有这些小小的碰撞产生的能量向外与引力抗衡，避免了气体云进一步坍缩，也为太阳提供了发光所需的能量。

暗物质的概念十分奇怪，但它扎根于事实。我们假设它存在，是基于薇拉·鲁宾和弗里茨·兹威基的研究，以及今天我们仍能观察到的现象。暗物质和近年来天文学家发现的遥远行星一样真实。科学家不曾亲眼见过那些存在于太阳系以外的行星，也不曾触摸或者感受过它们，但“眼见为实”并不是科学的全部。科学也需要测量看不见的效应，最好是利用比我们的眼睛更强大、更灵敏的设备。我们知道系外行星真实存在，因为我们利用先进的设备研究了它们所环绕的恒星。通过观察这些恒星，我们找到了系外行星存在的坚实证据。



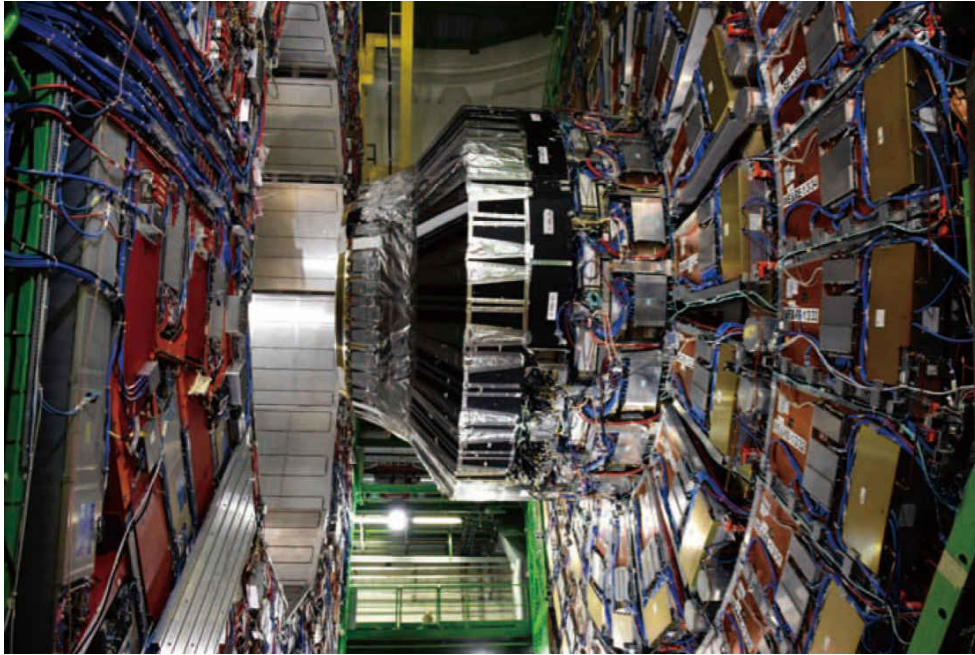
最糟糕的是，也许我们会发现暗物质根本就不是物质，而是某种别的东西。也许我们看到的是来自另一个维度的力产生的效应？⁽⁴⁾没

准我们感受到的是与我们的宇宙相邻的另一个幽灵宇宙里的普通物质产生的普通引力？如果真是这样，那个幽灵宇宙可能是更大的多重宇宙所包含的无数个宇宙中的一个。可能存在无数个版本的地球和无数个版本的你。

这听起来不可思议。但这难道还能比地球绕太阳旋转更疯狂？这个概念第一次被提出的时候，人人都以为地球是宇宙中心，他们觉得天空实际上是个巨大的穹顶。现在我们知道的更多了。我们知道，太阳是银河系的千亿恒星之一；我们知道，银河系是宇宙中的千亿星系之一。我们的母星并不像我们曾经以为的那样特别。地球的事我们搞错过一次，所以我们也可能把暗物质搞错了。



有的科学家怀疑，暗物质由我们尚未发现的神秘粒子组成。他们试图利用一种名叫“粒子加速器”的巨型机器在地球上制造暗物质。另一些团队设计了深埋在地底的实验室。如果有一些暗物质粒子正好在宇宙中游荡，其中一部分又正好经过地球，这些地下实验室应该能探测到它们。再说一遍，这听起来可能有些不可思议，但科学家曾利用类似的办法找到过另一种名叫中微子的神秘微粒。



科学家正利用图中这样的巨型地下探测器（它是全球最大的强子对撞机的一部分）研究暗物质之谜。

20世纪30年代，科学家正在努力认识原子，几位走在最前沿的思考者提出，可能存在一种几乎没有质量的粒子。刚开始的时候，他们并没有找到这种粒子存在的直接证据。但的确有一些原子会以某种未知的方式释放能量，有的科学家提出，“罪魁祸首”正是这种神秘粒子，它携带着能量离开了原子。尽管科学家没有直接的证据，但他们仍提出了中微子的概念，这种粒子几乎不与物质互动。几十年后，另一群科学家找到了这些粒子真实存在的证据。从此以后，人们一直在通过其他实验追踪、计量中微子。每秒都有千亿个来自太阳的中微子在你每一片指甲盖大小的身体上穿过，但它们什么也不会做。

中微子曾经只是一个出于直觉的科学概念，人们利用它来解释一些不合理的事情，结果发现它真的存在。或许我们也能找到某种办法来探测暗物质，就像探测中微子一样。或者更棒的是，我们会发现，

暗物质粒子是另一种完全不同的东西，它能利用另外某种——或几种——尚未被人类发现的力。

不过现在，我们只能暂且接受暗物质这位看不见的奇怪朋友，借助它来解释宇宙的奇怪现象。光是这一个概念就够好奇的天体物理学家忙活很久了，但暗物质并不是宇宙中唯一一个未解的大谜团。还有另一个有趣的谜题等待我们去解决。

6

是爱因斯坦错了吗？ 宇宙常数与暗能量

我小时候喜欢一个名叫“太空飞鼠”（Mighty Mouse）的卡通角色。当然，他是一只啮齿动物，但他总能力挽狂澜，而且他的歌剧腔调十分迷人——这个小家伙儿会唱歌。另外，他胸膛宽阔，体格强壮，而且会飞。

作为一名“好奇宝宝”，我不由自主地想弄清太空飞鼠为什么会飞。他没有翅膀，腰带上也没藏着推进器或者喷气发动机，但他披着一件斗篷。同时代另一位会飞的英雄超人也披着斗篷。莫非这就是他们的秘密？难道飞行的能力来自你选择的行头？

我很快提出了一套理论：斗篷赋予了人类和老鼠飞翔的能力。

尽管那时候的我还不是科学家，但我思考的方式已经很像他们了。但科学的繁荣需要的不仅仅是理论，你还得验证这些理论。所以我需要设计一个实验来验证自己的想法。我找来了一件斗篷，把它系在自己的脖子上，然后奋力向前跳去。

我测量了穿着斗篷的自己跳出的距离。

然后我脱下斗篷，又跳了一次，也测量了这次跳出的距离。

两个数字没什么区别。

穿着斗篷的我并没有跳得更远。我显然没有飞起来。但这给我上了宝贵的一课：在科学的领域里，理论应该符合实验证据。否则的

话，它要么需要调整，要么只能被扔进思想的垃圾桶。我猜测斗篷能让老鼠和人飞起来，但这套理论不符合跳跃实验的结果，所以我不得不抛弃它，继续向前走，学习其他人类飞行的方式——乘坐一种名为飞机的大机器。

但有时候，某些看似不可思议的理论却能通过现实的考验。阿尔伯特·爱因斯坦几乎一辈子都未踏足实验室。他是一位纯粹的理论家——这群科学家负责提出关于自然运作机制的理论。爱因斯坦更喜欢所谓的“思想实验”，也就是利用自己的想象力去解决问题。

比如说，16岁的时候，爱因斯坦开始思考：如果他有机会和一束光并肩奔跑，那会发生什么？这当然是不可能的，我们之前已经讨论过宇宙的速度上限。但对这个奇怪想法的思考让爱因斯坦忙活了好几年，最终引领他取得了自己最重大的突破。

爱因斯坦这样的理论家会提出宇宙运作机制的模型。利用这些模型，他们可以做出预测。如果模型有缺陷，观察者们——利用先进设备研究自然的科学家——就会发现预测和现实证据之间的冲突。儿时的我提出了一套飞行“模型”：斗篷能让人和老鼠飘在空中。然后我验证了这个模型——不需要任何先进设备——结果发现这套理论与现实不相符。我很失望，但要是科学家在其他研究者的模型里挑出了错，他们往往十分激动。我们都爱给别人的作业找碴儿。

爱因斯坦提出的是有史以来最强大、最具远见的理论模型之一：广义相对论。⁽⁵⁾这套模型详细描述了宇宙中的万物如何在引力的影响下运动，以及引力如何塑造空间本身。直到今天，科学家们仍在验证广义相对论做出的预测。

根据爱因斯坦的模型，黑洞在碰撞时会以引力波的形式向宇宙释放能量。与冲向沙滩的海浪在水面上的移动不同，这些引力波使空间本身荡起涟漪。可以肯定的是，当遥远的古老黑洞碰撞时产生的引力波掠过地球，科学家已经捕捉到了它们，这说明爱因斯坦是对的。

每过几年，实验科学家就会用更好的设备来验证爱因斯坦的理论。每次他们都会发现，爱因斯坦是对的。他不仅是班上最聪明的孩子，还是有史以来最聪明的人之一。

但即使是他也可能犯错。



和爱因斯坦同时代的人千方百计想证明他是错的。爱因斯坦的研究挑战了牛顿的理论，科学界有一部分人对此深感不悦。1931年，一群这样的人出版了一本名为《百位作者反对爱因斯坦》（*One Hundred Authors against Einstein*）的书。听说了这件事以后，爱因斯坦回应说：“如果我是错的，那只要一个人站出来反对我就够了。”

广义相对论完全不同于之前的任何引力理论。根据广义相对论，大质量物体实际上会扭曲周围的空间，造成空间变形，或者说，让时空的结构产生凹陷。

苹果这样的小质量物体产生的引力效应很小，但行星或恒星等大型天体会让空间产生严重的扭曲，甚至足以弯曲直线。20世纪的美国理论物理学家约翰·阿奇博尔德·惠勒（John Archibald Wheeler）是我的老师，他曾说过：“物质告诉空间如何弯曲，空间告诉物质如何运动。”

爱因斯坦定义的全新版本引力不仅会影响物质。引力弯曲了空间本身，所以就连光都只能屈服，在大质量天体附近沿曲线传播，而不是沿直线。爱因斯坦的模型描述了两种引力。其中一种我们十分熟悉：地球与掷到空中的球之间的引力，或者太阳与行星之间的引力。但广义相对论还预测了另一种效应：一种神秘的反引力压力。

今天我们知道，宇宙正在膨胀，宇宙中的星系正在彼此远离。但在当时，没有人认为宇宙除了存在以外还会干别的事情，这超乎任何人的想象。就连爱因斯坦也认为，宇宙只能是静态的，它既不会膨胀，也不会收缩。但他建立的模型却暗示了宇宙要么正在膨胀，要么正在收缩。爱因斯坦觉得这肯定不对，于是他提出了“宇宙常数”这个概念。

宇宙常数唯一的作用是抵抗爱因斯坦模型里的引力。如果说引力努力想把整个宇宙压成一大团，宇宙常数的任务就是把所有东西分开。

问题只有一个。

谁也没在自然界里发现过这种力。

从某种意义上说，爱因斯坦作弊了。



爱因斯坦提出广义相对论的13年后，美国天体物理学家埃德温·P. 哈勃（Edwin P. Hubble）发现，宇宙并不稳定。哈勃研究的是遥远的星系。他发现，这些星系在空间中不是静止不动的，它们正在远离我

们！还有，哈勃搜集的证据有力地证明，越遥远的星系远离银河系的速度越快。

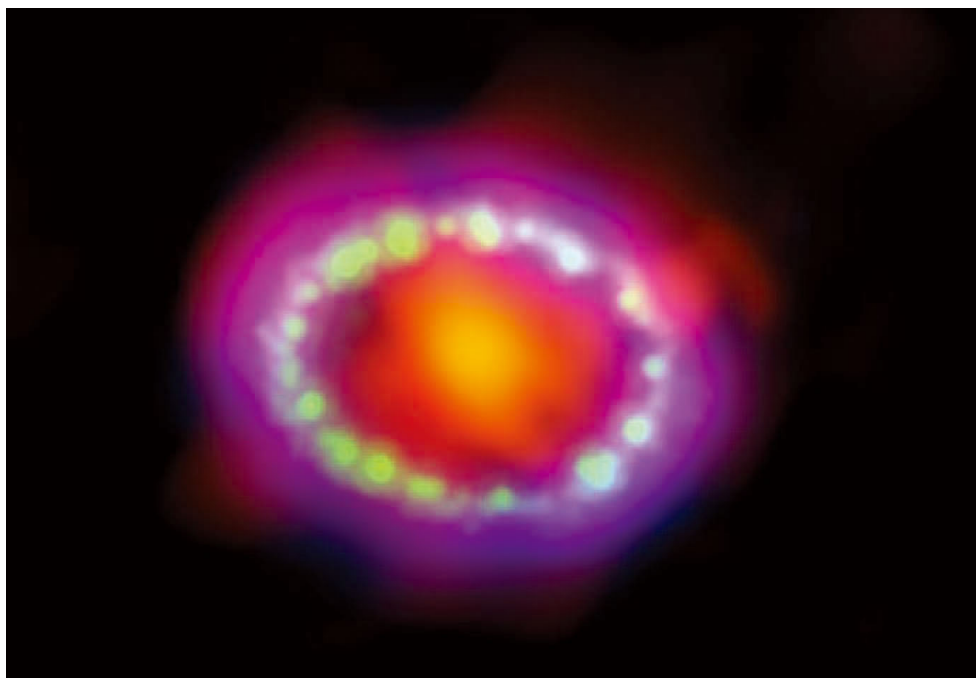
换句话说，宇宙正在膨胀。

听说了哈勃的发现以后，爱因斯坦十分惭愧，他自己本该预见到这件事。爱因斯坦彻底抛弃了宇宙常数，并说那是自己平生“最大的污点”。但故事并没有到此结束。接下来的几十年里，理论家时不时就会重拾宇宙常数。他们喜欢把自己的理论放到一个真正拥有这种神秘吸引力的宇宙中去思考。

1998年，科学最后一次把爱因斯坦的“最大污点”从坟墓中挖出来。

那年早些时候，两组相互竞争的天体物理学家宣布了他们的重大发现。这两个团队观测的都是一种名叫超新星的爆炸恒星。天文学家能预测超新星的运行、亮度和距离。

但这组超新星却不太一样。



在天体物理学的圈子里，这颗爆炸的恒星（超新星1987A）算得上一位名流。这类恒星帮助我们认识到，宇宙正在膨胀。

它们比预想的更暗。

可能的解释有两种。要么这几颗超新星和天体物理学家以前研究过的所有爆炸恒星都不一样，要么它们和我们之间的距离比科学家曾经预测的远得多。如果它们的距离确实更远，我们的宇宙模型就肯定有哪儿不对。

科学家会互相竞争吗？

会！当然会。我们之间的竞争和运动员或者象棋选手一样激烈。一般来说，身在科学界，你肯定不想被人抢跑。当年查尔斯·达尔文（Charles Darwin）听说另一位科学家阿尔弗雷德·拉塞尔·华莱士（Alfred Russel Wallace）准备提出和他相似的理论，就赶紧出版了后来我们所知的《物种起源》。他不想让华莱士获得进化论首创者的荣誉。这样的事情在科学界司空见惯，不过要我来说的话，宇宙足够大，容得下我们所有人。大家都有充分的研究空间。

后来，研究超新星的两个天体物理学家团队都获得了诺贝尔奖。在科学的世界里，这相当于打成了平手。

哈勃的研究揭示了宇宙正在膨胀，而这些超新星告诉我们，宇宙膨胀得比我们预想的还快。如果不借助爱因斯坦的“污点”——宇宙常数，我们就很难解释多出来的膨胀速度。天体物理学家掸掉尘埃，将这个常数重新放回爱因斯坦的广义相对论里，结果发现，他们的观测结果完全符合爱因斯坦的预测。

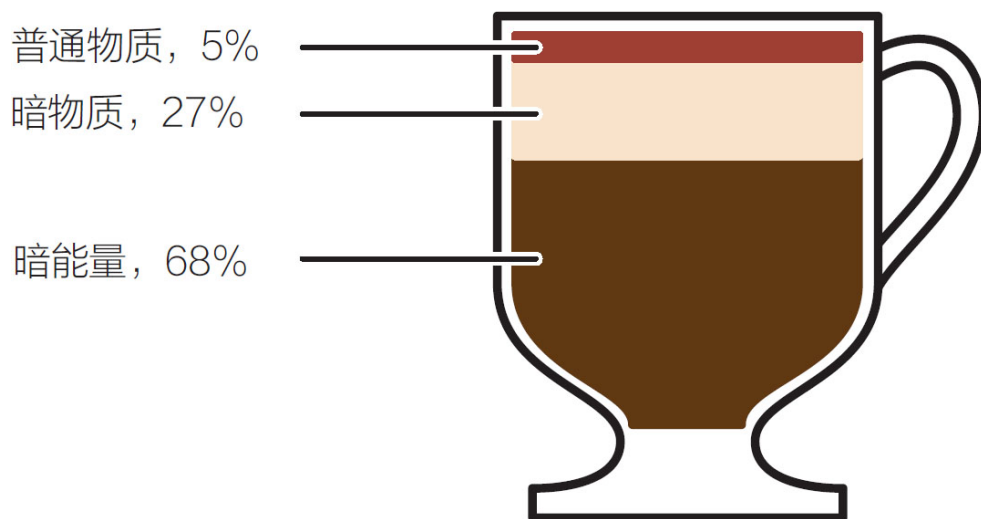
那些超新星就在它们应该在的地方。

所以爱因斯坦最终还是对的。

哪怕连他自己都以为错了，他还是对的。



这些高速超新星的发现第一次直接证明了宇宙中的确有一种抗衡引力的奇怪新力。宇宙常数真实存在，它需要一个更好的名字。今天我们叫它“暗能量”。



宇宙就像热可可：一杯热可可少不了奶油泡和肉桂粉。可可占68%，奶油泡占27%，肉桂粉占5%。

迄今为止最准确的测量表明，暗能量在宇宙中地位突出。宇宙由物质和能量共同组成。如果我们将宇宙中所有的物质和能量加起来，那么暗能量占据了68%，暗物质占27%，普通物质只占5%。

能让我们看到、感觉到、闻到的普通物质只是宇宙中很小的一部分。



所以这种神秘的力到底是什么？谁也不知道。最靠谱的猜测是，暗能量来自真空。在第四章里，我们不仅讨论了星系际空间的种种危险，还介绍了那些看似空旷的宇宙荒漠里发生的所有事情。粒子和它

们的反搭档时隐时现，互相摧毁。在这个过程中，每对正反粒子都会产生一点点向外推的压力。将整个宇宙里这些小小的推力全部加起来，也许你就能得到足够驱动暗能量的力。

这是个合理的想法。不幸的是，如果估算一下这种“真空压力”的总量，你会得到一个天文数字，远大于我们估算的暗能量总数。除了我的太空飞鼠实验以外，这恐怕是科学史上理论与实践之间差距最大的案例。所以“真空压力”不可能是暗能量的来源。

是的，我们毫无头绪。

不过等等。暗能量出自迄今为止我们建立的最棒的宇宙模型：爱因斯坦的广义相对论。它就是宇宙常数。不管暗能量到底是什么，我们已经知道了该如何去测量它，也知道该如何预测它对宇宙的影响，无论是过去、现在，还是未来。

毫无头绪为什么激动人心

读到这里，你可能已经注意到了，“毫无头绪”这个词我提到过不止一次。人们常常觉得科学家傲慢自信，但实际上，我们喜欢被宇宙难住。我们热爱困境，它如此激动人心。它驱动我们每天劲头十足地奔向岗位。作为科学家，你得学会拥抱未知。如果知道了所有答案，那你就没事可干了，只好回家去了。

这场狩猎还没有结束。现在我们知道，暗能量真实存在，多个天体物理学家团队正在你追我赶地揭示它的秘密。也许他们会成功，又或者我们需要建立另一套理论来取代广义相对论。也许有一套暗能量理论正等着还没出世的聪明人去发现，又或者未来的那位天才现在正在阅读本书。

小元素与大星球 元素周期表里的宇宙

上中学的时候，我问过老师一个我觉得很简单的问题，和元素周期表有关。几乎每间科学教室的墙上都挂着一张元素周期表，乍看上去，你可能误以为它是某种奇怪的桌面游戏。但这不是游戏。元素周期表呈现的是宇宙中全部118种元素，或者说118种原子。

总而言之，我当时问老师，这些元素来自哪里。

“地壳。”他回答说。

这个答案不尽如人意。学校供应实验室的元素样本肯定来自地壳，但对我来说，这个答案不够。我还想知道，这些元素是怎么跑到地壳里去的。是的，我就是那样的孩子⁽⁶⁾。我发现，答案肯定在天上。元素肯定来自太空。但要回答这个问题，你真的需要了解宇宙的历史吗？

是的，你需要。

普通物质由质子、中子和电子组成。质子和中子结合形成原子核，与此同时，电子绕着原子核旋转。把它们全都组合起来，你就得到了我们所说的原子。元素是一个或多个同类的原子，它们拥有相同数量、相同类型的粒子。氢是所有元素中最简单的一种，它只有一个质子和一个电子。一个或多个这样的氢原子共同组成了氢元素。

大爆炸产生的自然存在的——我们不曾在实验室里制造过的——元素只有三种，氢是其中之一。其余的元素都诞生在爆炸恒星高温的心脏和迸发的残骸里。作为元素指导手册的周期表在科学界的地位举足轻重。不过就连科学家也时常情不自禁地觉得，元素周期表就像一座动物园，里面装满了苏斯博士(7)虚构出来的独一无二的怪物。归根结底，这些元素实在太奇怪了。

元素周期表



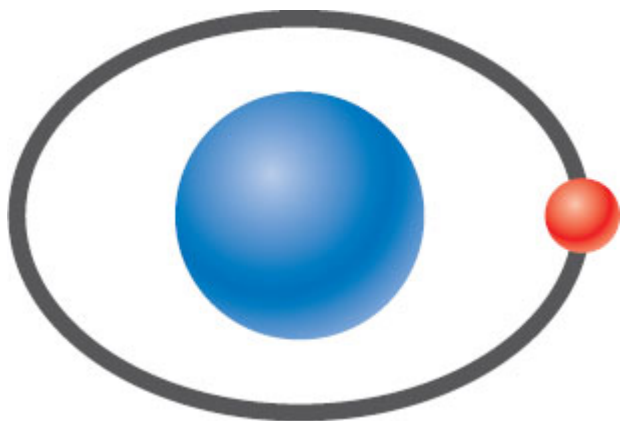
比如说，钠是一种能被黄油刀切开的有毒金属。你还会在周期表里找到氯，它是一种臭烘烘的致命气体。元素周期表告诉你，这两种危险元素可以共同组成分子，这个主意听起来很糟糕吧。但要是真的把钠和氯结合起来，你就会得到氯化钠，它有一个更常见的名字：食盐。

或者我们再来看看氢和氧？前者是一种爆炸性气体，后者则能助燃。把氢加到火里，火焰就会蹿得很高。但元素周期表告诉我们，这两种元素也能配对。氢和氧的结合产生了液态水，它能灭火。

元素周期表里充满奇迹。我们可以审视每一种元素，了解它们迷人的奇妙特性。不过正如你现在可能已经意识到的，我更愿意聚焦恒星。所以请允许我以天体物理学家的视角，带你去元素周期表里转一圈。

宇宙中最受欢迎的元素

作为最轻、最简单的元素，所有的氢都是在“大爆炸”中生成的。在自然界中发现的94种元素里，氢是数量最多的一种。人体内每三个原子就有两个是氢。而在整个宇宙中，氢占据原子总数的9/10。在太阳中心的酷热火炉里，每一天的每一秒都有45亿吨高速运动的氢粒子发生聚变。太阳的光芒就来自这些聚变产生的能量。

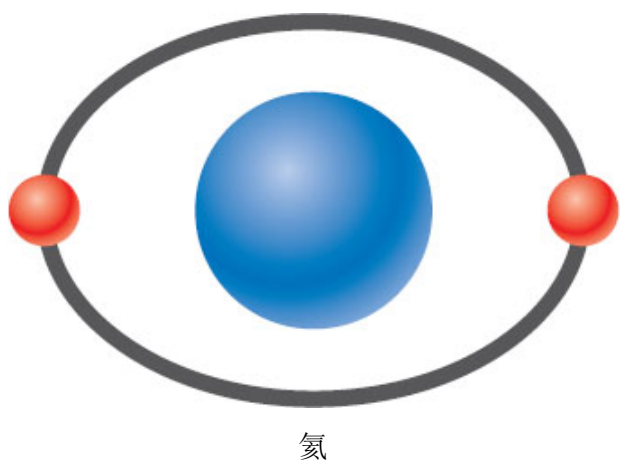


氢

元素中的亚军

你对氦的认识可能来自生日派对。气态的氦几乎和氢一样轻。不过正如我说过的，氢很容易爆炸。在幼儿园小朋友的生日派对上，氢气球是非常危险的装饰品。只要有一个氢气球不巧飘到了生日蜡烛旁边，谁都别想活下来拆礼物，所以我们用氦气来吹气球。吸一口这种

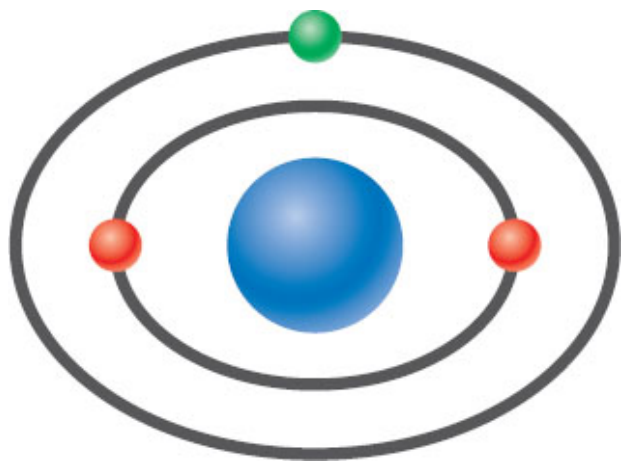
古怪的气体，再说几句话，你会发现自己的声音变得和米老鼠一样滑稽。



氦是宇宙中第二简单、第二常见的元素。和氢一样，氦也是在大爆炸中生成的。不过恒星也会制造氦。虽然氦的分布没有氢那么广泛，但在整个宇宙里，它的数量仍是其他所有元素总和的四倍之多。

不幸的余烬

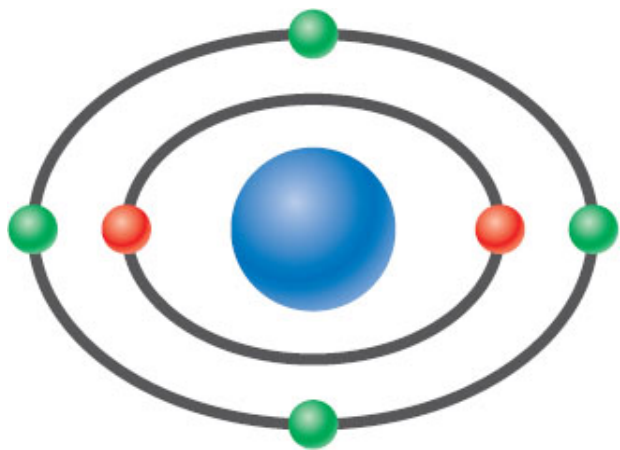
拥有三个质子的锂是宇宙中第三简单的元素。和氢、氦一样，锂也是在大爆炸中生成的，而且它能帮助科学家验证大爆炸理论。根据大爆炸模型，宇宙中任何区域的锂原子都不应该超过总原子数的1%。目前我们还没有发现任何星系的锂原子超过这一上限。理论预测与天文观测结果的吻合进一步证明，我们的宇宙的确是从大爆炸开始的。



锂

孕育生命的元素

碳元素简直无处不在。碳诞生于恒星内部，随后它盘旋着升向恒星表面，再被喷洒到星系中。碳元素组成的分子种类比其他任何元素都多，据我们所知，碳是生命最重要的成分之一——从渺小的植物、虫子到大象和人类的流行明星。比如说，赛琳娜·戈麦斯（**Selena Gomez**）就是碳基生命。

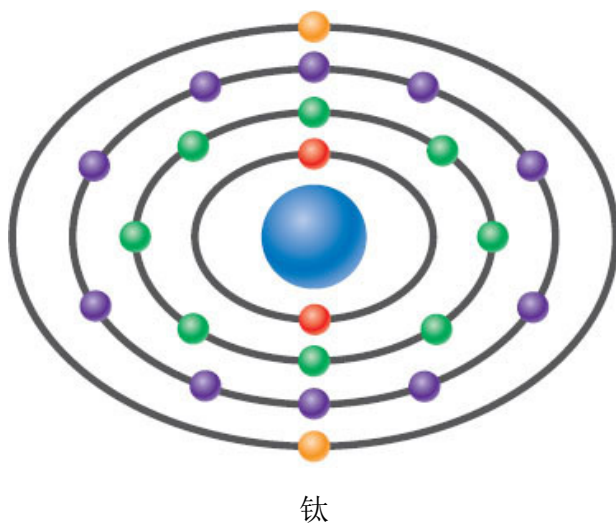


碳

但那些我们还不知道的生命呢？宇宙中会不会存在不由碳和氧组成的外星生命形式？比如说硅基生命？科幻作家爱写硅基外星生命的故事。外星生物学者——这些科学家致力于研究其他行星上的生命可能的样子——也一直在考虑这种可能性。不过归根结底，我们仍认为大部分生命应该是碳基的，因为宇宙中的碳比硅多得多。

重元素

铝在地壳中占据着不小的比例，厚厚的地壳包裹着地球狂野的心脏。古人不了解铝。我个人十分偏爱这种元素，因为抛光的铝可以做成近乎完美的镜子。望远镜里装着能够放大、聚光的镜子，好让天体物理学家更清晰地看到遥远的天体。今天几乎所有的望远镜都选择使用铝涂层的镜子。

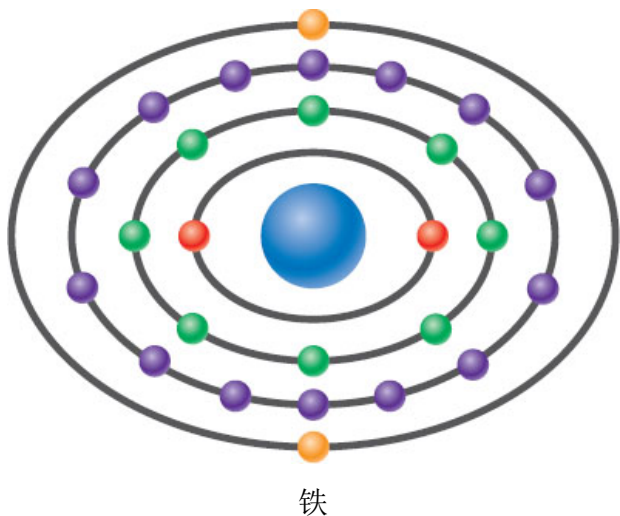


另一种重元素钛的名字来自强大的希腊神祇泰坦。钛的强度是铝的两倍以上，它可以用来制造军用飞机、义肢（人造的腿和手臂），还有曲棍球棒。这种元素也是天体物理学家的朋友。

宇宙中大部分地方的氧比碳多。这两种分子都不爱独处，所以碳原子会和氧原子结合。哪怕所有碳原子都抓住了一两个氧原子，仍有一些多余的氧原子可以和其他元素结合。氧和钛结合在一起，就会生成氧化钛。天体物理学家在某些恒星内部探测到了氧化钛的存在。最近，一组科学家发现了一颗被氧化钛包裹的新行星。我们甚至会给望远镜的某些零件刷上一种含有氧化钛的白色涂料，因为它能帮我们锐化来自恒星和其他天体的光。

恒星杀手

铁不是宇宙中最常见的元素，但它可能是最重要的一种。小小的元素在巨大的恒星内部不断碰撞、聚合。氢原子彼此碰撞，聚合成氦，然后氦又进一步聚合成碳、氧和其他元素。最终恒星内部的原子会大得足以聚合成铁，这种元素的原子核拥有26个质子和至少等量的中子。比起只拥有一个质子的氢，铁简直就是庞然大物。



铁原子中的质子和中子是所有元素中能量最弱的。这个事实带来了一个简单而激动人心的后果。因为这些粒子都是“哑弹”，所以它们

会吸收能量。正常情况下，如果你撕碎一个原子，它会释放能量。同样地，两个原子聚合组成新原子的过程也会释放能量。

但铁跟其他原子不一样。

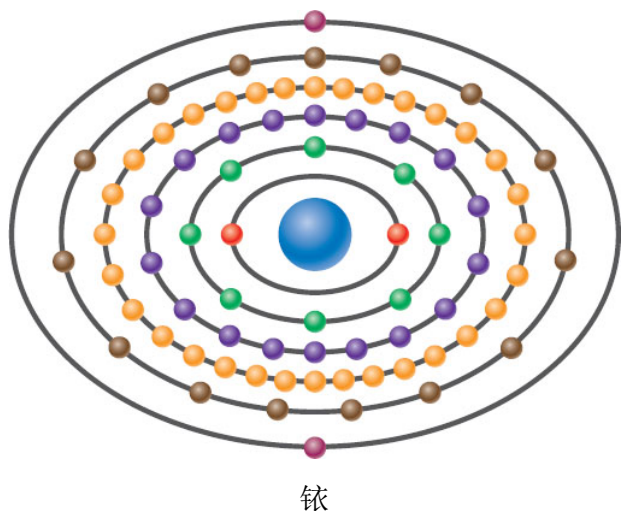
如果你把铁原子撕碎，它们会吸收能量。

如果你让它们聚合起来，它们还是会吸收能量。

恒星忙于制造能量。比如说，我们的太阳就是一间能量工厂，它释放的高能光子充斥着整个太阳系。不过，一旦大质量恒星的中心开始生成铁，它们就离死亡不远了。铁越多，能量越少。失去了能量来源的恒星会被自身的重量压垮、爆炸，释放出比太阳亮十亿倍的光，持续一周以上。多亏了铁，恒星核制造出来的元素才能穿过宇宙，为更多恒星和行星提供种子。

恐龙毁灭者

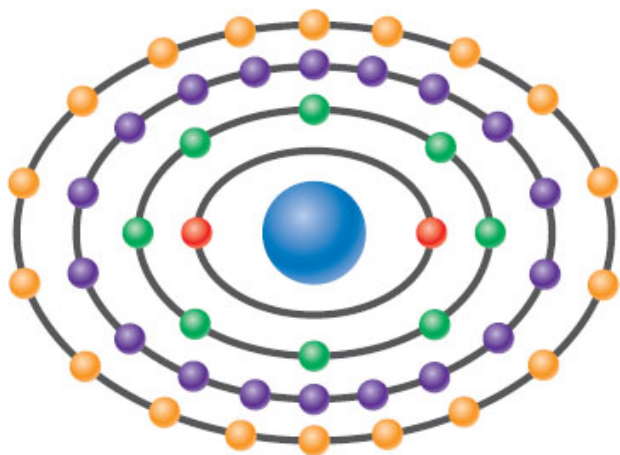
铱是元素周期表中第三重的元素。铱很少存在于地球表面，但地表广泛分布的稀薄铱层透露了我们这颗星球的过往。6500万年前，一颗大小相当于珠穆朗玛峰的小行星撞击了地球，小行星本身在撞击中蒸发，但它杀死了地球上体形大于随身行李箱的所有生物。所以，无论你偏爱哪种恐龙灭绝理论，来自外太空的巨型小行星杀手都应该名列前茅。



尽管铈在地表并不常见，但它普遍存在于大型金属小行星里。这些巨型太空岩石向地球发起自杀式撞击的时候，它内部的铈会随着一大团尘埃云喷溅出去，让铈原子飘落在地球表面。今天的科学家在挖掘地层、研究6500万年前的地表情况时就发现了一层分布广泛的薄薄的铈。

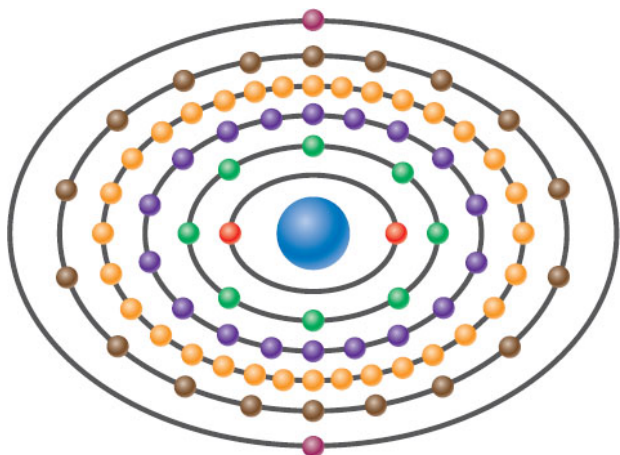
众神

元素周期表中有一部分元素的名字来自行星和小行星，而这些天体又是以罗马神祇命名的。19世纪初，天文学家发现火星和木星之间有两颗围绕太阳运行的天体。他们以丰收女神之名将第一颗命名为“刻瑞斯”（Ceres，谷神星），又以罗马智慧女神的名字将第二颗命名为“帕拉斯”（Pallas，智神星）。谷神星命名后，人们发现的第一种元素被命名为铈（cerium）；天文学家找到智神星后又用它来命名了此后第一种被发现的元素——钯（palladium），电影里托尼·斯塔克用来给钢铁侠外骨骼提供能量的正是这种物质。⁽⁸⁾



钡

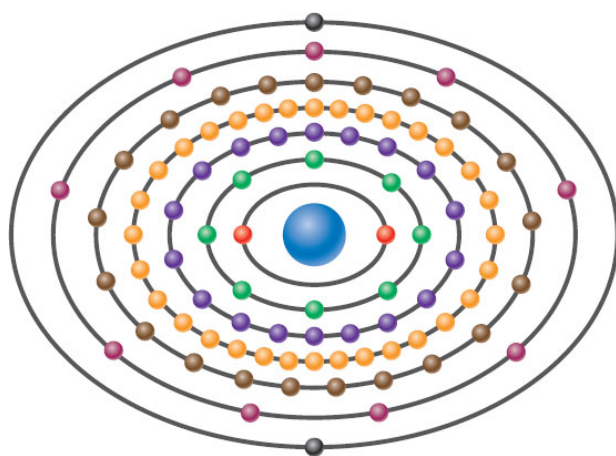
汞是一种室温下呈流动液态的银色金属，它的名字来自罗马的飞毛腿信使之神。钷的名字则源自强大的北欧雷神托尔，难怪托尔和钢铁侠关系那么好，元素将他们连接在一起。



汞

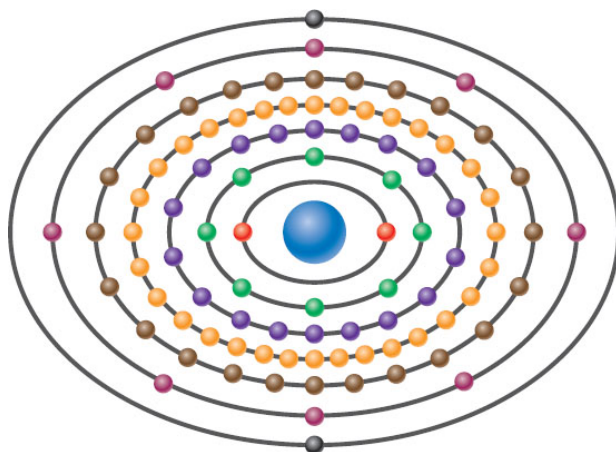
没有用我最爱的行星——土星⁽⁹⁾命名的元素，但天王星（Uranus）、海王星（Neptune）和冥王星（Pluto）都有各自的代表元素（它们的名字都是罗马的神祇）。以天王星命名的铀（uranium）是实战中使用过的第一颗原子弹的主要成分。太阳系里，海王星排在天

王星后面，所以元素周期表里以海王星为名的镎（neptunium）也紧跟着铀。



铀

周期表里的下一种元素钚（plutonium）不是在自然界里找到的。但科学家设法制造出了足够的钚，并将它装进一颗原子弹里；美国在日本城市长崎上空投下了这颗原子弹，仅仅三天前，他们还在广岛投下了另一颗以铀为燃料的原子弹，第二次世界大战由此迅速结束。有朝一日，我们或许可以利用少量特殊的钚驱动飞船，前往外太阳系。



钚



既然我们已经来到了太阳系边缘，那么通过元素周期表进行的宇宙之旅也该告一段落了。出于某种我不理解的原因，很多人不喜欢化学物质。也许只是因为它们的名字听起来很危险。可是对于这个问题，我们应该责怪的是化学家，而不是化学物质本身。我自己并不反感化学物质，毕竟我最爱的恒星和最亲密的朋友都是由它们构成的。

8 完美主义者 世界为什么是圆的

我每次吃汉堡包都会想起土星。汉堡包本身当然跟土星没关系，但它的形状——尤其是顶上那片圆面包——很有宇宙的风范。它让我想起宇宙是多么偏爱完美的圆球，而球形的天体又是如何在旋转中变形的呢？

我们不妨以土星为例。这颗巨行星自转的速度比地球快得多。你的一天有24个小时，因为我们这颗星球上的某个点——比如说你现在坐着或者站着的地方——需要耗费24个小时才能转完一圈。地球赤道（这颗行星的腰线）上的任何物体都随着地球本身以1 600千米的时速转动。这个速度听起来似乎很快，要知道，飞机的时速只有885千米左右。但无论是飞机还是地球，它们的速度都比土星慢得多。我第二热爱的行星只需要10.5个小时就能转完一圈，或者说，土星的一天只有10.5个小时。而且，土星比地球大太多了，所以要在这么短的时间内转完一圈，土星的赤道时速必须达到35 400千米。



看哪，这就是土星，我第二热爱的行星！土星上的一天只有10.5个小时。

如果我们的星球也转这么快，你在学校里的时间就会被压缩到20分钟左右。但暑假也同样会缩短，而且我们根本就不会存在。

快速旋转的物体会变得越来越扁。比如说，地球就不是完美的球形。我们的行星绕着一根联通南北极的虚拟直线旋转，两极之间的距离小于赤道直径，换句话说，地球的两极比赤道更平坦一点点。

圣诞老人为什么应该去赤道度假

如果地球自转的速度加快16倍，那么离心力会让赤道上的所有东西失去重量。正是因为离心力的存在，旋转木马的乘客才会被推向场地边缘；在你拎着水桶转圈甩的时候，桶里的水不会洒出来，也同样是离心力的功劳。哪怕是现在，以地球目前的自转速度，胖嘟嘟的圣诞老人在赤道上的体重也会比他在北极时轻450克左右，因为离心力在极地不起作用。谁不愿意在度假时有个好心情呢？所以要是平时你想找圣诞老人，我会建议你先去赤道看看。

一点点的意思是说：大约只有42千米。

物体转得越快就变得越扁，于是我的思绪又回到了汉堡包上。由于土星的旋转时速高达35 400千米，所以这颗行星的两极比赤道扁了足足10%。这么大的区别哪怕透过业余的小望远镜也能看得出。土星绝不是完美的球形，倒更像汉堡包，腰线凸出，头上顶着“圆面包”。



宇宙热爱球形。除了晶体和岩石碎块以外，宇宙里没几样东西天然拥有棱角。虽然很多物体形状各异，但球形物体的名单长得简直没完没了，从简单的肥皂泡到星系，不胜枚举。

冷知识

扁平的球被称为椭球。

地球和土星都是椭球。

宇宙对球形的偏爱源自物理定律，比如说表面张力。这种力将物体表面的材料凝聚在一起。我们以肥皂泡为例。肥皂泡由肥皂和水组成，里面包裹着空气。液体的表面张力使得肥皂泡从所有方向挤压其内部的空气，所以它在成形后很快就会利用最小的表面积来包裹这些空气，这样强度才能达到最大，因为除非必要，肥皂膜不需要扩展得更薄。而在体积相同的情况下，表面积最小的形状是完美的球形。

事实上，如果所有集装箱和超市里所有食品的包装都是球形的，我们每年就能节省好几十亿美元。一个半径11.5厘米的球形罐子就足以装下一大包脆谷乐麦圈，但谁也不愿意在超市里追着去捡货架上滚落的包装食品。

因为缺乏引力，旋转的空间站里所有东西都没有重量，你可以轻轻挤出适量熔化的——或者说液态的——金属，这些小液滴会悬浮在半空中。等到金属冷却变硬，表面张力就会使它们变成绝对完美的球形。



对行星和恒星这样的大型天体来说，表面张力没那么重要。将它们塑造成圆形的是能量和引力。引力不仅能拽落树上的苹果、弯曲空间，它还会努力从各个方向压缩物质，尽量缩小物质占据的空间。但引力有时候也会输——固态物体的化学键很强。地球上最高的山脉——喜马拉雅山之所以能冲破引力高耸入云，全靠地壳里岩石的巨大力量。

在为地球上的高峰欢呼之前，你应该知道，和其他行星相比，地球的表面还算平坦。在攀登喜马拉雅山的渺小人类眼里，这片山脉如此庞大，尤其是对我这样的城里孩子来说，大山看起来简直无边无际。你肯定觉得，要是从远处观察，地球看起来肯定凹凸不平，因为地面上有这么多山脉。但以天体的标准而言，地球表面其实十分光滑。如果你拥有一根超级巨大的手指，那么当你抚摸地球表面（包括海洋和其他地形）的时候，你会发现它像桌球一样光滑。有的地球仪塑造了凸出地表的山脉，但它们的比例完全失真。尽管地面上有凹凸不平的峰谷，而且两极略显扁平，但从太空中看去，地球就像一个完美的圆球。

和太阳系里其他一些山脉相比，地球上的山只能算小矮子。火星最高的火山奥林匹斯山高约2万米，底部宽度近500千米，相比之下，阿拉斯加的麦金利山看起来就像鼯鼠丘，就连珠穆朗玛峰的高度也不到它的一半。

你说这不公平？火星人的运气怎么就这么好呢？其实宇宙的造山秘诀十分简单：天体表面的引力越弱，它的山峰就越高。珠穆朗玛峰差不多是地球上的山峰能达到的极限高度，再高的话，承载山峰的岩层会被它的重量压垮，引力也会把它拽塌。

从另一个方面来说，火星的引力比地球小得多。一名体重30千克的四年级学生在火星上只有11千克。因为火星的引力更小，所以那里的山峰可以长得更高，所以奥林匹斯山才会那么高。



作为地球上最高的山脉，喜马拉雅山没法再长高了。引力会把它拽塌。

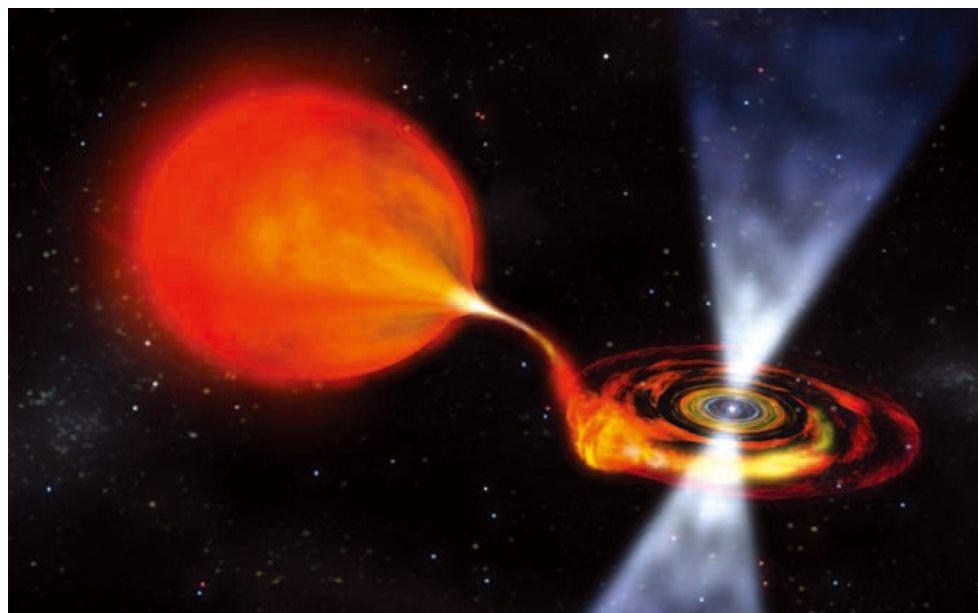


当然，地面上有高耸的山峰和低洼的山谷，但从太空中观察，我们的星球看上去就像一个完美、平滑的球体。



装饰晴朗夜空的恒星也是圆的。恒星是巨型的气体团，在引力的作用下，它们形成了近乎完美的球形。但要是某颗恒星过于靠近另一个强引力天体，后者就会开始掠走它的部分物质。这种现象在双星系

统里十分常见，这些成对的恒星被引力束缚在一起，其中一颗通常是垂死的巨型恒星，我们叫它“红巨星”。双星系统中的另一颗恒星会吸走红巨星的物质，将它拉成类似“好时之吻”巧克力的形状。



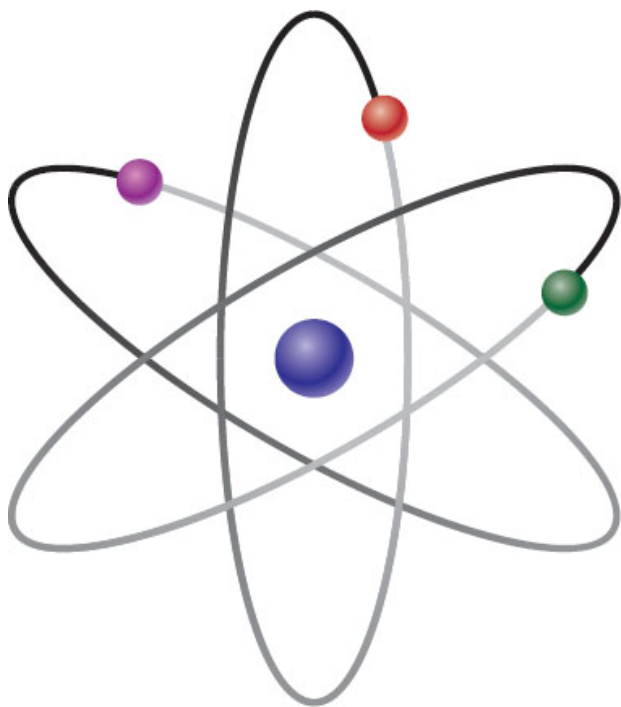
在艺术家绘制的这幅双星系统概念图里，旋转的中子星正在吸收来自它垂死的邻居——一颗发光的红巨星的物质。



接下来我们要讲的就有点奇怪了。

想象一下，大约1000万头大象被塞在一支唇膏里。

要达到这么高的密度，你得费不少劲。原子内部的质子和中子组成了中央的原子核，电子在原子核外绕着它们运行。绕轨运行的电子和致密的原子核之间是空旷的空间。要把这么多大象塞进唇膏管里，你只能压缩原子核和电子之间的所有空间。这一举动将把几乎所有（带负电的）电子挤进（带正电的）质子里，创造出一团（电中性的）中子球。



这颗中子星名叫维拉（Vela），它也是一颗脉冲星。维拉转得比直升机的旋翼还快。

认识一下脉冲星，它也是我最爱的天体之一。脉冲星由气体云（而不是大象）组成，但它的密度堪比刚才那个例子里装了1000万头大象的唇膏管，所以它表面的引力也很强。脉冲星上的山脉高度大概

不会超过这页书的厚度。但由于强引力的存在，要想爬上这座小小的山峰，你消耗的能量可能比地球上的攀岩者爬5000千米高的悬崖还多。

我们认为，脉冲星应该是现实宇宙中最完美的球体。



星系组成了形状各异的星系团，有的看起来很不规则，有的被拉成细细的线条，还有的就像一个大平面。但美丽的后发座星系团（我们在介绍暗物质的章节里认识了它）形成的是美丽的球形。

后发座星系团也是我们所说的“松弛系统”。请关掉你脑子里一群星系悠闲倾听抒情爵士乐的画面。这里的“松弛”完全是另一回事。它的含义十分丰富，其中包括一点：你可以通过系统内各个星系运动的速度和方向推测系统的总质量，但你不必亲眼看到系统里的每一个大型天体。通过跟踪这些星系，科学家还能推测系统里藏着多少影响星系运动的看不见的物质，或者说“暗”物质。

正是出于这些原因，松弛系统是我们探测暗物质的绝佳工具。请允许我更加肯定地说一句：要是没有松弛系统，我们可能根本不会发现宇宙中到处都有暗物质。



最大、最完美的球体是可见宇宙，或者说，我们的望远镜能看到的那部分宇宙。

无论我们望向哪个方向，星系都在快速远离。离我们越远的星系运动速度越快。无论哪个方向都有一个足够远的距离，那里的天体远

离我们的速度和光一样快。一旦超过这个距离，恒星之类的天体发出的光来不及到达地球就会失去所有能量。在穿越这个膨胀宇宙的过程中，光会不断被拉长变暗。既然这些天体发出的光无法抵达地球，我们自然也无法观测到它们。任何方向都存在这样的界限，所以它们最终形成了一个球。

对我们来说，这个球形“边界”以外的宇宙既看不见，也不可知。但你可以自由想象，那里会有些什么东西。

9

假鼻子与望远镜 捕捉不可见光

1572年11月11日，丹麦天文学家第谷·布拉赫在傍晚散步时注意到，天空中出现了一颗明亮的新天体。布拉赫曾在决斗中失去了一部分鼻子，他从没用过望远镜观察星星，和他同时代的其他天文学家也没有。但长期的观星经验告诉他，这颗天体肯定是新出现的。

那天晚上布拉赫发现的是一颗正在爆炸的恒星，也就是所谓的超新星。

大部分超新星出现在遥远的星系里，但如果有一颗恒星在我们的银河系里爆炸，那么它的亮度足以让所有人看见，完全不需要望远镜。事实上，1572年那次爆炸释放的奇异光芒得到了广泛的记录。1604年的另一次超新星爆发也造成了相似的影响。不幸的是，这是我们星系里最近的两次超新星奇观。

今天，我们利用强大的望远镜研究宇宙遥远彼端爆炸的恒星。望远镜搜集到的所有信息通过一束光传给地球上的科学家。但超新星释放的不仅仅是可见光——人类裸眼能看到的光，它们射出的光还有一部分是我们看不见的。

现代天文望远镜能捕捉所有类型的光，要是没有它们，天体物理学家绝不会发现宇宙的某些惊天秘密。

第谷的鼻子

让著名天文学家第谷·布拉赫失去鼻子的那次决斗不像你想的那么老派。事实上，这次战斗源于一场关于数学的争执。他住在一座城堡里，还养了一头麋鹿作为宠物。至于第谷戴了大半辈子的那只假鼻子，有流言说它是用银子或者金子做的，但几年前科学家们真的挖出了这位著名学者的遗骸，并在他的鼻骨附近找到了铜的痕迹。还有同样未经确认的流言说，布拉赫可能是被谋杀的。我向你们保证，朋友们，现代天体物理学家的生活绝不会这么戏剧化。



1800年以前，除了用作动词和形容词以外，“光”这个词指的仅仅是可见光。但在那年年初，英国天文学家威廉·赫歇尔（William Herschel）（早在1781年，他就因为发现了天王星而声名鹊起）开始探索阳光、颜色和热之间的关系。起初，赫歇尔将棱镜（一种能将光分成不同颜色的玻璃设备）放在一束阳光中，但他并没有发现什么新东西。艾萨克·牛顿爵士早在17世纪就做过同样的实验，并给我们熟悉的彩虹的七种颜色起了名字：红橙黄绿蓝靛紫。

牛顿用棱镜将一束阳光分成了不同的颜色，但好奇的赫歇尔还想知道，各种颜色的温度有没有区别。于是他在每种颜色的光里各放了

一支温度计。当然，他发现不同颜色光的温度的确不一样。比如说，红光就比紫光暖和。

他还在光谱外面，也就是红光的范围外放了一支温度计。按照赫歇尔的预想，温度计的读数应该不超过室温，但事实却不是这样。这支温度计的读数甚至比放在红光里的那支还高。这意味着除了他一直研究的那几种颜色的光以外，阳光中还藏着某种新形式的光。

罗伊·G.比夫

为了记住七种颜色的顺序，你可以利用一个小窍门：把每种颜色的首字母拼起来，组成一个名字，罗伊·G.比夫（Roy G. Biv）。当然，比夫先生是个虚构出来的角色，不过我觉得他应该留着一把大胡子，没准还握着一支手杖。



一束看不见的光。

赫歇尔无意间发现了“红外”线，这是我们所说的电磁波谱——包含可见光和不可见光的加大版彩虹——中全新的一部分。其他研究者立即跟随赫歇尔的脚步走了下去。1801年，一位德国物理学家在光谱

的紫色端也发现了不可见光存在的证据。紫色以外是什么？“紫外”线，今天我们通常简称为“UV”。

审视整个光谱，从低能低频光到高能高频光，它们分别是无线电波、微波、红外线、罗伊·G.比夫、紫外线、X射线和伽马射线。这份名单里有很多种古代科学家并不熟悉，甚至完全不知道的光，但今天的我们正学着研究、利用它们。



不知为何，天体物理学家花了很长时间才造出了能探测各种不可见光的望远镜。300多年来，科学家一直把望远镜当成帮助肉眼拓展视野的工具，就像用于太空的放大镜。越大的望远镜能看到的天体越远；镜片的形状越完美，它形成的图像就越清晰。但这些新形式的光需要新的硬件。比如说，要探测X射线，你需要特别光滑的镜子。要想捕捉长长的无线电波，你的探测器倒不必那么精确，但在你的能力范围内，你应该把它造得越大越好。

超新星释放的光芒是全谱段的，包括可见光和不可见光，但单台的望远镜或探测器不可能把它们全都捕捉到。解决这个问题的方案很简单：采集多台望远镜的图像，然后把它们拼接起来。虽然我们“看”不到不可见光，却能用特定的颜色代表不同类型的光，再结合所有望远镜和探测器记录的数据，得到一幅完整的图像。

这正是我为超人朋友做的事，我是说在漫画里。超人来到海登天文馆拜访我和同事的时候，我告诉他，我们还没有拿到望远镜的数据。为了观察超人母星太阳的死亡，我们请求世界各地的天文台将望远镜对准他的家乡。要搜集这么多望远镜和探测器的数据，并把它们

转化为一幅直观的图像，这是一个巨大的挑战。事实上，漫画里天文馆的电脑无法完成这个任务。所以超人自己——他的大脑正是一台超级计算机——将所有数据拼接起来，生成了一幅母星太阳爆炸的图像，包括可见光、红外线和其他形式的光。

我知道，对于超人，大家津津乐道的总是他不怕子弹，眼睛能发射激光，会飞，诸如此类。但要我说，他能处理这么多天体物理学数据，甚至比超级计算机还快，这才是真正的超能力。



人类建造的第一批捕捉不可见光的望远镜是射电望远镜。这类观测仪十分奇妙。1929年到1930年，美国工程师卡尔·G.扬斯基（Karl G. Jansky）成功建造了第一台射电观测仪。它看起来有点像机械化农场里的移动洒水系统，高耸的矩形金属框架转起来又像旋转木马，搭载设备的轮子则来自一辆福特T型车的备胎，几年前，这款车曾风行一时。为了捕捉波长约15米的无线电信号，扬斯基建造了这台长达30米的设备。



卡尔·G.扬斯基的望远镜之所以会被比作旋转木马，是因为它在捕捉来自太空的无线电信号时会不停旋转。



76米宽的MK1望远镜坐落在英国，它于1957年开始搜寻无线电波。

当时的科学家相信，无线电波只可能来自近处的雷暴或者地球上的其他源头。利用这台奇怪的天线，扬斯基却发现，某些无线电波可以追溯到银河系中心。有了新的观测手段，射电天文学应运而生。

科学家们终于可以通过可见光以外的其他东西观察天空了。

现代的射电望远镜有时候大得超乎想象。1957年投入使用的MK1是地球上第一台真正的巨型射电望远镜——这台宽达76米的单体可旋转碟形天线坐落在英国曼彻斯特附近的卓瑞尔河岸天文台，它的主体由坚固的钢铁构成。世界上最大的射电望远镜建成于2016年，它名叫“500米口径球面射电望远镜”，或者简称“FAST”。这台耗资1.8亿美元的设备坐落在中国贵州省，它的面积比30个足球场加起来还大。

如果未来某天，外星人给我们打了一个电话，中国人肯定第一个知道。



要搜寻微波，我们有阿塔卡马大型毫米波阵列（ALMA）的66台天线。ALMA坐落在南美洲智利北部偏僻的安第斯山区，它让天体物理学家得以追踪其他望远镜看不见的宇宙事件。透过这台望远镜，我们可以看到巨型气体云转化为孕育恒星的温床。

ALMA修建在地球上最干旱的地方，这里离海平面大约有5千米，最潮湿的云层被它远远地甩在脚下。这是科学家们有意为之，地球大气中的水蒸气会吸收ALMA和其他探测器试图捕捉的微波，天体物理学家希望这些信号尽量完好无损地进入望远镜。所以，要想不受干扰地观测天体，你必须尽量减少望远镜和太空之间的水蒸气，就像ALMA的设计者所做的那样。



拥有66台天线的巨型望远镜ALMA坐落在偏僻的安第斯山区，它让科学家得以研究恒星如何诞生。

一般来说，远离大城市的干燥天空是观察宇宙的好地方。这也是我小时候最爱的暑假旅行目的地——乌拉尼伯营地——选址在沙漠里

的主要原因。



刚才我们介绍了观测无线电波和微波的望远镜，它们的波长都比较大。而在光谱中波长特别短的那头，你会找到高频高能的伽马射线。虽然早在1900年，人们就发现了伽马射线的存在，但直到1961年，NASA在探险家11号卫星上搭载了一种新的望远镜以后，我们才在宇宙中探测到了这种光。

漫画迷都知道，伽马射线对你没好处。科学家布鲁斯·班纳就是在一次实验事故中照射了伽马射线才会变成《复仇者联盟》系列电影里那个肌肉发达、满腔怒火的绿巨人浩克。但伽马射线其实很难捕捉，它们会穿透普通的镜片和镜子。所以探险家11号搭载的望远镜放弃了直接捕捉伽马射线，而是用一台设备来记录伽马射线穿过时留下的证据。

我最不喜欢的超级英雄

不，伽马射线不会把你变成绿色的怪兽，但从科学的角度来说，这不是我不喜欢浩克的原因。要知道，布鲁斯·班纳是个普通体形的男性，可是当他变成浩克以后，他一下子暴涨到2.7米高，重达数百千克，甚至可能不止。班纳获得了质量——这违反了物理定律。你不可能凭空获得质量。我可以认为浩克身体里多出来的物质是由能量转化而来的，但如果真是这样，那他没准会耗尽整座城市的能量。

两年后，美国发射了一系列新的卫星——维拉号来寻找爆发的伽马射线。

当时，美国担心苏联正在测试危险的新核武器。这类试验会释放出伽马射线，所以美国发射了卫星来寻找证据。维拉号的确找到了爆发的伽马射线，而且几乎每天都有。但这跟苏联没关系。他们观测到的伽马射线来自宇宙彼端的爆炸。



今天，我们的望远镜可以探测光谱中所有类型的不可见光。现在我们既能观测波长十多米的低频无线电波，又能研究波长不超过千万亿分之一米的高频伽马射线——这种光相邻波峰之间的距离小得超乎想象。

对天体物理学家来说，这些望远镜是他们解答各种问题的工具。想知道星系里的恒星之间藏着多少气体？射电望远镜会告诉你答案。对宇宙背景辐射和大爆炸感兴趣？微波望远镜至关重要。想窥探银河系气体云深处的景象，了解恒星是如何诞生的？红外望远镜可以帮助你。想不想研究黑洞？紫外线和X射线望远镜是你的最佳搭档。想观察巨型恒星能量十足的爆炸？请透过伽马射线望远镜欣赏这出大戏吧。

尽管在第谷·布拉赫的年代，天空中有那么多秘密等待我们去发现，但我还是更愿意做今天的观星者。不光是因为我们这个时代更文明一点，没人想削掉我的鼻子，更因为对天体物理学家来说，这是一个了不起的年代，因为我们知道，宇宙中有一些最激动人心的事件是看不见的。

而我们能将它们尽收眼底。[\(10\)](#)

10

拜访太阳系邻居 行星、彗星和卫星

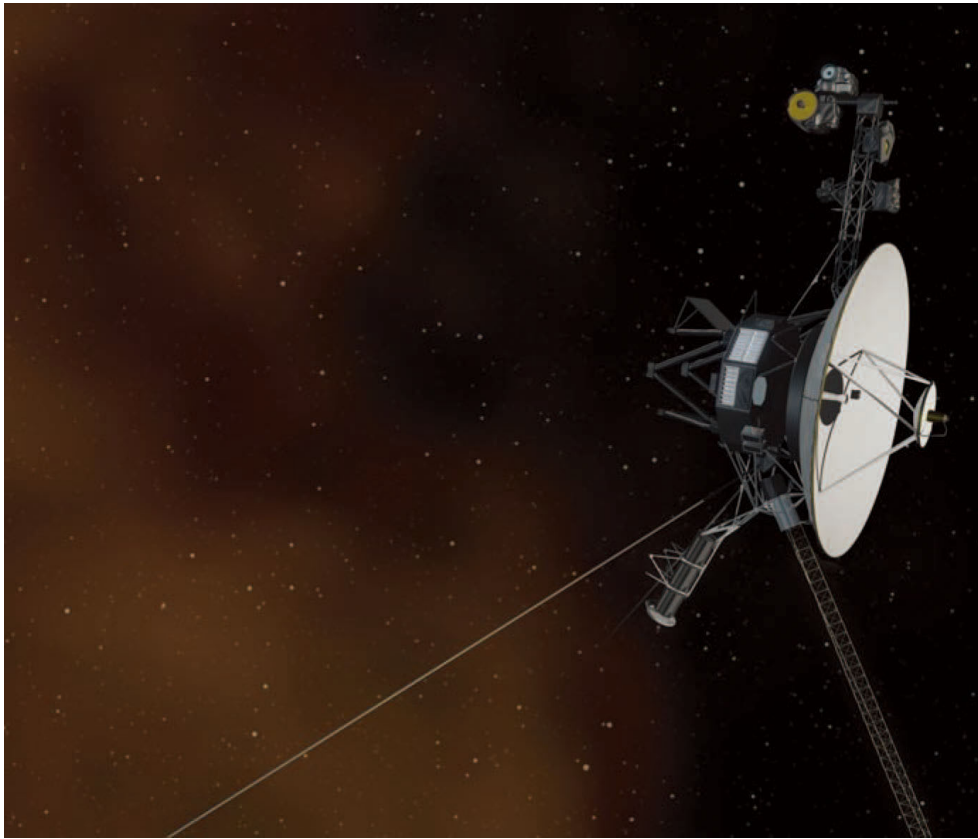
眺望太阳系的外星人也许会觉得它看起来很空旷。太阳、所有行星和它们的卫星只占据了太阳系里很小的一部分空间。但我们的太阳系并不空旷。一点也不。行星之间的太空里点缀着各种各样的大小石块、冰球、尘埃、带电粒子流和许许多多探测器。

我们的太阳系一点也不空旷，实际上，绕轨运行的地球每天都会遭遇好几百吨流星——其中大部分比一粒沙还小。几乎所有流星都会在地球的上层大气（包裹我们这颗星球的空气层）中燃烧殆尽。这些闯进大气层的流星携带的能量极高，所以它们一接触大气就蒸发了。这是件好事。要是没有这层空气保护毯，我们的祖先没准早在远古时期就已经被太空岩石灭族，根本不可能演化成今天上网发自拍的我们。

更大一些（高尔夫球大小）的流星在蒸发前常常会裂成很多小块。虽然它们在穿过空气时表面可能被烧焦，但总归有机会到达地面。在我们这颗星球的早期历史上，坠落的流星不计其数，它们的撞击甚至熔化了我们的地壳，也就是这颗行星坚硬的表层。

大量太空垃圾造就了月球。有证据表明，年轻的地球是被一颗火星大小的天体撞歪的。这次撞击将大量尘埃和岩石送到了绕地球运行的轨道上，这些碎屑渐渐聚集到一起，形成了低密度的可爱月亮。

被太空岩石狂轰滥炸的天体不止地球一个。月球和水星表面的诸多环形山都是过去的撞击留下的证据。太空中充满了大大小小的石块，那是火星、月球和地球被高速天体撞击后飞溅出去的碎屑。每年大约有1000吨火星岩石坠落到地球上，月球岩石的数量可能也差不多。所以要搜集月球岩石，我们或许不必派遣宇航员登月。降落到地球上的月岩已经够多了。



旅行者1号和旅行者2号

自从1977年发射升空后，这两艘飞船一直在宇宙中飞行。2012年，旅行者1号成为第一个离开太阳系的人造物品；不久后，图中所示的旅行者2号也跟上了它的脚步。这里可以了解到这两艘飞船的近况：<https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/status/>。

掘金太空岩石

大部分陨石都“扑通扑通”掉进了海里，因为水覆盖了我们这颗星球表面的72%。不过有人喜欢搜集陨石，这项爱好有时候非常昂贵。一位“陨石猎手”说，这些石头是“从天而降的钞票”，合适的太空岩石真的能让你赚到钱。2012年，有人以33万美元的价格卖掉了一块来自月球的岩石。



太阳系里的大部分小行星分布在小行星带里，这片大致扁平的区域位于火星和木星轨道之间。小行星带看上去其实更像一个压扁的甜甜圈，而不像一条带子；艺术作品里的小行星带通常充满了缓慢运动的散落岩石。这些小行星里的任何一颗——可能有几千颗——都可能在未来某天撞向地球。大部分小行星将在未来1亿年内坠向地球。如果小行星的直径超过1千米，撞击释放的能量就足以毁灭地球上的绝大部分陆地物种。

真糟糕。

彗星也可能威胁地球上的生命。最著名的哈雷彗星大约每隔75年就会从夜空中划过一次。这颗巨型冰石块比地球的年纪还大，它最后一次出现是在1986年。如果哈雷彗星撞上了地球，那么它带来的冲击力相当于100万座火山同时爆发。

这也很糟糕。

但哈雷彗星下次造访地球是在2061年，而且它和我们之间的距离够远，不至于毁灭文明。如果到时候你在地球上，没忙着计划去月球酒店的行程或者修理自己的家用机器人，那我建议你找一台像样的望远镜。



图中的哈雷彗星非常值得一看，但我们不希望它离地表太近。否则就太糟糕了。

往柯伊伯带外面再走很远，大约在太阳系和最近的恒星中间，分布着许多彗星，我们称之为“奥尔特云”。这片区域是长周期彗星的家，它们的轨道半径很大，所以这些彗星转完一圈需要的时间比人的一生长得多。20世纪90年代最亮的两颗彗星——海尔-波普彗星和百武彗星——都来自奥尔特云。短时间内它们不会回来，所以你没机会看到它们。不过我可以向你保证，它们真的非常壮丽。百武彗星的亮度很高，不用望远镜，你站在纽约时代广场中间就能看到它。



我最后一次计数的时候，太阳系里的所有行星一共拥有56颗卫星。某天早上我醒来，发现科学家又发现了十几颗绕土星运行的卫星。从那之后，我决定停止计数。现在我只在乎哪颗卫星足够有趣，值得造访或者研究。我至少能想出几个候选对象。从某种角度来说，太阳系里的卫星比它们围绕运行的行星迷人得多。

土卫六泰坦是我第二热爱的行星最大的一颗卫星，这颗卫星上的细流汇聚成河，又汇成一个个巨型湖泊。这些湖泊里的液体不是水，而是甲烷。我们已经发射了一艘飞船去研究这颗卫星，毫无疑问，近距离的观察必然能揭示更多有趣的细节。

我最爱的卫星可能是绕木星运行的那些。这个系统里充满了奇怪的天体。离木星最近的木卫一伊娥是太阳系里火山运动最活跃的地方，这颗卫星的温度极高，不适合造访。木星的另一颗卫星木卫二欧罗巴覆盖着一层冰盖，所以它也不是理想的度假地点。但要是你想寻找地外生命，欧罗巴是太阳系里最值得期待的地方之一。如果说除了地球以外，我们的恒星系里有什么地方最适合寻找生命，那必然是这里。

乍看上去，天体物理学家可能不会觉得欧罗巴适合生命存活。一般情况下，我们会寻找宜居带（“金发姑娘带”）里的行星和卫星。我们在第一章里讨论过，这位年轻的金发闯入者不喜欢自己的粥太冷或者太烫，天体物理学家在寻找适合孕育生命的行星时也遵循同样的准则。我们寻找的区域不能离恒星太近，高热会蒸发地表水分，而我们知道液态水对生命至关重要。但要是离恒星——欧罗巴的恒星是太阳——太远，水又会结冰，那就太冷了。我们要找的是那些既不冷也不热的行星。

欧罗巴不在宜居带里，而且它冰冻的表面也不像是适合孕育生命的地方。但我们发现，这颗卫星不需要太阳。绕木星运行的过程中，欧罗巴的形状会发生变化。来自行星的引力时而将它抓紧，时而松开，这个过程将能量传递给了欧罗巴，加热了海洋冰层下方的水。我们有理由认为，这些温暖的水已经存在了上亿年。想在地球以外的地方寻找生命，欧罗巴应该是我们的下一个目的地。

欧罗巴任务

我们都想去欧罗巴。那里可能蕴藏着惊天动地的科学发现。但我们需要解决几个高难度工程学问题。首先，我们必须向这颗卫星发射一艘飞船，然后这艘飞船，或者它搭载的另一艘更小的飞船，必须从轨道上降落到欧罗巴冰冻的地表。接下来，我们还得玩一玩冰钓。覆盖海面的冰层厚度可能超过1.6千米，我们必须钻透冰层才能抵达下方的水面。然后，我们还需要另一个探测器——一艘能在水里漫游的潜艇——去搜集信息，再把这些信息送回地球上如饥似渴的科学家手里。是的，这是个艰难的挑战。但想象一下我们可能发现什么！



从传统上说，行星以罗马神明命名，它们的卫星则以希腊神话中的人物为名。这些古典的神祇社会生活十分复杂，所以不必担心名字不够用。唯一违反这条规则的是天王星的卫星，它们的名字来自英国戏剧和诗歌里的英雄。在这里，你看不到“欧罗巴”和“伊娥”这样的名字，倒是能找到“帕克”和“爱丽儿”，他们俩都是威廉·莎士比亚戏剧里的精灵。（前者不是冰球^{[\[1\]](#)}，后者也不是小美人鱼）

1781年，威廉·赫歇尔，就是发现不可见光的那位科学家，找到了我们单靠肉眼看不见的第一颗行星。当时他打算把这颗行星的名字献

给自己忠诚侍奉的国王。要是赫歇尔成功了，那么太阳系里的行星名字就会变成：水星、金星、地球、火星、木星、土星和乔治。幸运的是，几年后，人们决定采用天空之神的名字“乌拉诺斯”来命名这颗行星，它就是天王星。



虽然太阳系里所有的行星和卫星都有了名字，但还有很多小行星没有命名。发现者可以随心所欲地给它们起名字，如今我也得为太阳系里的某块“太空垃圾”负责。2000年11月，大卫·列维（David Levy）和卡罗琳·苏梅克（Carolyn Shoemaker）发现的主带小行星1994KA以我的名字命名为“13123 Tyson”。虽然我很感激，但也不必为此感到飘飘然。很多小行星都顶着我们熟悉的名字，比如乔迪、哈里特或者托马斯，甚至有小行星叫梅林、詹姆斯·邦德和圣诞老人。要不了多久，数以十万计的小行星没准就会耗尽我们起名的灵感。不管那一天会不会到来，想到我的太空碎片在行星际空间中并不孤单，我很高兴。

同样令我高兴的是，至少现在，我的小行星还没有撞向地球。

外星人眼中的地球 生命存在的证据

要理解地球在遥远的外星智慧生物眼中的样子，我们不妨远离地面，从太空中看看地球。

在地球上，从一个地方去另一个地方，无论你是喜欢奔跑、游泳、走路还是骑车，你都可以近距离观察这颗行星上无限丰富的细节。你也许会看到一只蛾子困在蜘蛛网里，一滴水从树叶上滑落，一只寄居蟹匆匆爬过沙地，或者一名少年鼻子上的青春痘。

从地面上看，地球的细节十分丰富，你只需要睁眼去看。

现在我们开始上升。透过正在爬升的飞机舷窗，这些地面上的细节很快就会消失。没有蜘蛛的开胃菜。没有受到惊吓的螃蟹。没有青春痘。当你飞到离地面约1万米的巡航高度，你甚至很难认出自己生活的镇子。

向太空上升的过程中，细节不断消失。国际空间站的轨道高度大约是400千米。透过空间站的窗户，你或许能在白天找到巴黎、伦敦、纽约和洛杉矶，但前提是你必须熟悉地理。你可能连吉萨的大金字塔都看不见，更别说中国的长城了。

冷知识

你能从太空中看到中国的长城吗？不能！尽管长城绵延万里，但它的宽度大约只有6米——比美国的高速公路窄得多，要知道，你在高空飞行的飞机上就很难看到地面的高速公路了。

如果你站在40万千米外的月球上看，纽约、巴黎和地球上其他灯火闪烁的城市连光点都算不上。但你还是可以看到地球上空大片的冷空气和其他大型天气现象。现在不妨假设你趁火星离地球最近的时候——约5 600万千米——登上了那颗红色星球。透过后院里的大型望远镜，你应该能看到冰雪覆盖的宏伟山脉和大陆的边缘。但也仅此而已。你不会看出地球上还有城市。

而在48亿千米外的海王星上，太阳的亮度只有地球上的千分之一。至于地球？它变成了一颗不比暗星亮多少的斑点，完全淹没在太阳的光辉中。

我们有证据：1990年，旅行者1号飞船在刚刚越过海王星轨道的位置拍摄了一张地球的照片。深空中的地球看起来毫不起眼，用美国天体物理学家卡尔·萨根（Carl Sagan）的话说，就是一个“暗淡蓝点”。这个形容已经够慷慨了。看到旅行者1号拍摄的那张照片，你没准根本不知道里面还有地球。

如果某些大脑袋的外星人从很远很远的地方透过最先进的望远镜眺望天空，那会怎样？行星地球上有哪些可见的特征有可能被他们探测到？



旅行者1号太空探测器拍摄的这张照片是地球和月球的第一张合影。等到这艘飞船越过海王星轨道后，地球就成了一个遥远的“暗淡蓝点”。

蓝色，这应该是最显眼的。水覆盖了地球表面的2/3还多，光是太平洋就几乎占据了地球的整整一面。如果这些外星人能探测到地球的颜色，他们也许会猜测，这片蓝色来自水。他们可能也很熟悉水，不光是因为水是生命的来源，还因为它是宇宙中最常见的分子之一。

如果外星人的设备足够强大，那么除了一个暗淡蓝点以外，他们还能看到一些别的东西。他们会看到海岸线，这意味着地球上的水很可能是液态的，因为冰冻的星球不可能有海岸线。聪明的外星人肯定知道，如果一颗行星上有液态水，那它很可能栖息着生命。

外星人还会看见地球极地的冰冠，它会随着气温的变化扩张、缩小。通过研究地球表面，跟踪大块陆地出现和消失的周期，他们还会发现，我们这颗行星每24小时自转一圈。于是他们知道了地球上一天的长度。这些外星人会看到大型天气系统的出现和消失。他们可以研究我们的云。

现在我们该考虑一下外星人是不是真能看见我们了。

最近的系外行星——围绕除太阳以外的其他恒星运行的最近行星——藏在离我们大约4光年外的“邻居”半人马座 α 星系里。也就是说，光需要一口气跑4年才能到达那里，既不能停下来加油也不能上厕所。光速约为30万千米每秒，所以4光年外的半人马座 α 星的那位“邻居”实际上离我们非常非常远。



太阳系外离我们最近的行星围绕4光年外的半人马座 α 星运行。

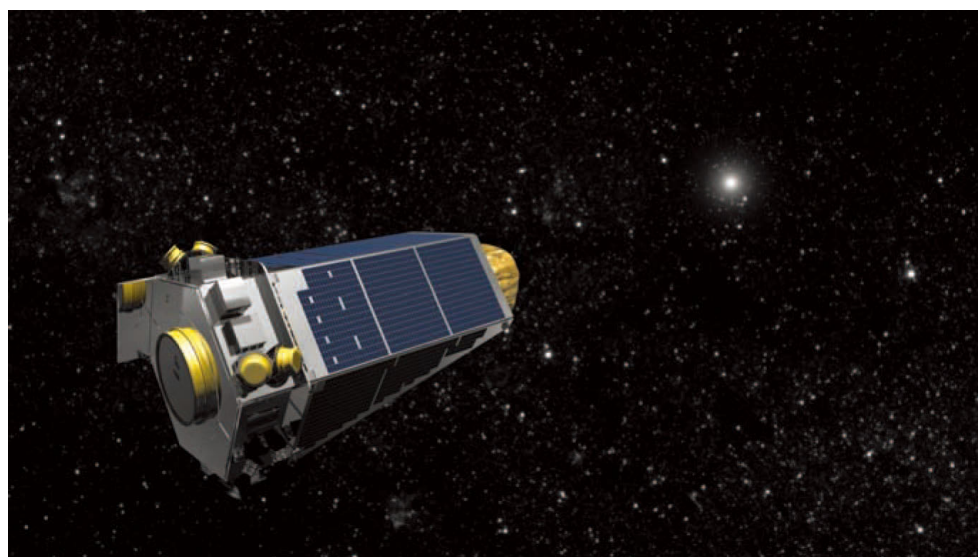
但这已经算很近了。科学家发现的大部分系外行星距离我们几十到几百光年。地球的亮度不到太阳的十亿分之一，所以单靠可见光望远镜，那些行星上的外星人几乎不可能看见我们。这就像试图探测一盏巨型探照灯旁萤火虫的光芒。所以，如果外星人真能找到我们，他们看到的很可能是我们发出的不可见光，例如红外线。在红外波段，太阳和地球的亮度反差没有那么大。

又或者他们的工程师采用了另一种完全不同的策略。



我先假设你曾在朋友的照片里抢过镜头。就连成熟的天体物理学家也无法拒绝这种普通恶作剧的诱惑，实际上，我们用来寻找遥远恒星的一种技巧和“抢镜头”有相似之处。正如远处的外星人很难发现地球，我们也难以直接看到遥远的行星。所以，NASA设计建造了一台望远镜——开普勒太空望远镜，来寻找那些抢了附近恒星镜头的渺小行星。

开普勒望远镜寻找的是那些总亮度会周期性下降一点点的恒星。在这种情况下，开普勒的“视线”刚好能看到一颗恒星变暗了一点，那是因为围绕它运行的行星正好掠过它的正面，就像一只小虫子从你和朋友的照片上飞过。这种方法不能让你直接看到行星，更别说行星表面的任何地貌。但你可以看到，那里的确有东西。开普勒发现了成千上万颗系外行星，其中包括几百个拥有多个行星的恒星系，就像我们的太阳系一样。



了不起的开普勒望远镜帮助科学家发现了成千上万颗新行星。其中某颗行星上会不会栖息着生命？

外星人也可以利用这种技术来探测地球。观察太阳的时候，他们会探测到它的亮度降低了一点，那是我们的行星闯进了太阳和他们之间。很好。他们会发现地球的存在，但不会知道地表的任何事情。

无线电波和微波可能会有帮助。也许这些“听墙脚”的外星人拥有类似FAST（我们在第九章中讨论过中国这台巨大的500米射电望远镜）的设备。这样一来，只要他们调到正确的频率，我们就将成为天空中最明亮的光源之一。我们的现代广播、手机、微波炉、车库自动门、车钥匙和通信卫星全都在叽叽喳喳地发出信号。地球在这些长波段上非常耀眼。如果外星人选对了望远镜和探测器，这些信号将成为确凿无疑的证据：这颗行星上的确有非同寻常的东西。

地球看起来就像在举办一场相当有趣的派对。



神秘的无线电波曾让科学家陷入困境，他们曾短暂地想过，说不定真有外星人试图跟我们交流。1967年，天体物理学家安东尼·休伊什（Antony Hewish）和他的团队试图在天空寻找强烈的无线电波，结果却发现了非常奇怪的事情：一颗遥远的天体正在以略快于每秒一次的频率发出脉冲。当时，第一个注意到这件事的是休伊什手下的一名研究生——约瑟琳·贝尔（Jocelyn Bell）。

也许那是另一个文明在向宇宙宣示他们的存在——外星人发出的无线电版本的“喂，我在这里！”这个想法十分诱人，但贝尔却觉得它很烦人。当时，她正在努力攻读研究生学位，那些想象中的小绿人和他们发出的信号实在令人分心。不过几天后，她又发现了来自银河系其他地方的重复信号。贝尔和其他科学家意识到，他们发现的不是外

星人，而是一种新的天体——一种完全由中子组成的恒星（就是密度相当于在一支唇膏里装了1000万头大象的那种恒星），它们每自转一圈就会发出无线电波的脉冲。休伊什和贝尔形象地叫它们“脉冲星”。贝尔不光拿到了学位，还做出了20世纪最重要的发现之一。

谁该得奖？

虽然科学家们普遍认为约瑟琳·贝尔——她现在叫约瑟琳·贝尔·伯奈尔——发现了脉冲星，但表彰这项工作的诺贝尔奖却发给了她的导师安东尼·休伊什。1977年，贝尔·伯奈尔坚持说，她没觉得自己受到了冷落，但很多人认为贝尔没得奖是因为她的性别。从那以后，因为发现了脉冲星和后续的其他研究，贝尔·伯奈尔获得了其他许多奖项，她一直非常支持女性从事科学工作。



探测外星人——或者说先进的地外生命探测我们——的方式还有很多。地外文明可以通过研究我们这颗行星的光来探查地球附近存在哪些分子。如果一颗行星拥有植物和动物，那么它的大气中应该富含我们所说的“生物标记”。别以为这是什么魔法标记，生物标记分子其实更像某种线索。如果一颗行星拥有生物标记，科学家们就知道，那里可能存在生命。这些分子广泛存在于拥有生命的环境中。

地球上的甲烷就是一种生物标记。一部分甲烷来源于自然，例如腐烂的植物；剩下的则是人类活动的副产品，例如燃油制造、稻米种植、排污，以及家畜放的屁。

是的，有朝一日，牛屁说不定会帮助外星人发现我们。

不过，对寻找我们的外星人来说，最醒目的信号应该是我们的大气中自由飘浮的氧。氧是宇宙中第三常见的元素，它的化学性质十分活跃，就像学校里跟谁都能跳舞的那个孩子。能和氧结合的元素包括氢、碳、氮、硅等。它甚至能与自己结合。这种分子不喜欢孤单和自由。

所以，如果外星人看到了自由飘浮的氧，他们或许会猜到，一定有什么东西让它们解脱了束缚。在地球上，我们知道“罪魁祸首”是生命。光合作用（植物将阳光转化为养料的过程）创造出了海洋和大气中的自由氧，空气中的自由氧又使人类和动物王国的几乎所有成员得以生存。

土卫六上有牛吗？

现在科学家们正在争论，火星上的少量甲烷和土卫六泰坦上的大量甲烷来自哪里。甲烷从哪儿来？很不幸，反正不是外星牛。土卫六上流淌着甲烷的河流，整片的湖泊里也充斥着这种生物标记。

我们这些地球居民已经知道氧和其他生物标记的重要性，但外星人只能自己去搞清这件事。如果他们认为，这些线索是生命存在的确凿证据，那么他们也许会进一步想，那些生命是否有智慧。有时候，我也会问自己这个问题。

不过，真有外星人在宇宙中寻找生命的迹象吗？第一颗系外行星发现于1995年，就在我写下这段话的时候，系外行星的总数已经超过了4000颗。现在，科学家们认为，仅在银河系就有多达400亿颗尺寸和地球相仿的行星。有了这么庞大的基数，在外面的某个地方，没准真有什么人或者什么东西，正在眺望我们。

12

在小蓝点上眺望 用宇宙视角看万物

孩子们最难认清的事实是，自己其实不是宇宙的中心。我还记得自己5岁生日那天，妈妈从商店回到家里，在蛋糕中间插了一根蜡烛。那根蜡烛做成了数字5的形状。我惊讶极了。商店里的人知道我满5岁了！他们专门为我制造了这根蜡烛。

无论如何，当时我真是这么想的。我根本没有考虑过，全世界那么多孩子都会满5岁，所以这样的蜡烛应该有很多。这件事和恒星、星系有什么关系？

天体物理学教会了我们，我们也不是世界的中心。

从天体物理学的角度来看，就连宇宙也可能不是唯一的。这门学科让我们以宇宙的视角看待万事万物。

但谁会以这样的方式思考呢？谁能从宇宙的高度看待生命？肯定不是那些为了养活家人辛劳工作的农民，也不是工厂里靠着制作电子元件换取微薄薪水的工人，更不是垃圾堆里翻找食物的流浪汉。你需要生存以外的闲暇时间。或者你需要足够年轻、足够舒适，不必担心食物或者安全问题，并且愿意从手机应用、短信或者最新的电视剧里抬起头来，眺望星空。

宇宙视角蕴含着隐藏的代价。当我跨越千里，只为了在日全食时月球快速移动的阴影中停留片刻，有时候我会忘记地球上的事情。

当我停下来思考膨胀的宇宙、匆匆远离彼此的恒星和不断延伸的时空经纬，有时候我会忘记地球上还有数不清的人食不果腹、无家可归，其中有很多是和你一样的孩子。

当我沉醉于跟踪小行星、彗星和行星的轨道，它们就像宇宙芭蕾中踮着脚的舞者，在引力的指引下翩翩起舞，有时候我会忘记太多人忽略了地球大气、海洋和陆地之间的微妙关系。

有时候我会忘记，有权有势的人很少倾尽全力，去帮助那些无力自救的人。

我偶尔会忘记这些事，是因为无论世界在我们的心灵中、头脑里、特大号的电子地图上有多大，宇宙都比它更大。有的人可能觉得这件事令人沮丧，但我却备受鼓舞。

我相信，你有时候会被大人责骂，他们会说，你的问题没有那么重要。他们甚至会提醒你，世界不是围着你转的。但我们大人也需要告诉自己这句话。

如果世界上的每个人，特别是那些拥有权势和影响力的人，都能以开阔的视角看待我们在宇宙中的地位，那会怎样呢？从这个角度去看，我们的问题会变小——甚至不复存在，大家都能包容彼此的小小差异，而不是为此争执吵闹。



2000年1月，刚刚修缮一新的纽约海登天文馆推出了题为“宇宙通行证”的太空秀，游客可以亲身体会宇宙视角，从天文馆出发，直至宇

宙边缘。观众先是看到了地球，然后是太阳系，他们看到亿万颗恒星随银河系不断缩小，最终变成天文馆穹顶上几乎微不可见的小点。

开馆仪式后的一个月內，我收到了一位大学教授写来的信，他专门研究那些让人觉得自己渺小的东西。我从来不知道竟然还有这方面的专家。他想向观众发放一份对比问卷，调查他们在观看了这场太空秀后有多沮丧。他在信中说，“宇宙通行证”让他感觉十分糟糕。

怎么会这样？每次观看这场太空秀（以及我们制作的其他节目），我总是深受鼓舞、精神焕发，感觉宇宙和我息息相关。我还感觉自己变得很大，因为重量只有1 400克的人类大脑让我们认清了自己在宇宙中的地位。

请容我说一句，对自然有所误解的不是我而是这位教授。他觉得人类比宇宙中的其他所有东西都更重要，因此他的自我认识无理地膨胀了。

不过也要说句公道话，出于强大的社会惯性，我们大多数人都是这么想的。我自己也曾这样想过，直到有一天，我在生物课上学到，在我体内一个小点上生活的细菌也比地球上生活过的所有人加起来还多。这类信息会让你重新思考，到底谁——或者说什么东西——才是真正的主人。

我知道你在想什么：我们比细菌聪明。

毫无疑问，我们的智慧的确超过地球上任何一种奔跑、爬行或滑行的生物。但人类到底有多聪明呢？我们烹制食物。我们创作诗歌和音乐。我们玩艺术，搞科研。我们擅长数学。就算你不再擅长数学，也肯定比最聪明的黑猩猩强得多，它们连除法都不会。

不过，从宇宙的角度来看，我们也许没有那么聪明。想象一下，也许有一种生命形式，他们和我们之间智慧的差距就像我们和黑猩猩的一样。对这样一个物种来说，我们最高的智力成就完全不值一提。他们的孩子学的可能不是芝麻街栏目里的ABC，而是高等数学。对这些生物来说，就连刚从外星幼儿园放学回家的小蒂米都比爱因斯坦聪明。

我们的基因——引导人类婴儿生长发育成大人的密码——和黑猩猩没有太大的差异。的确，我们比黑猩猩聪明一点。但事实上，我们只是自然的一部分，既不比任何东西高，也不比它们低，只是其中的一分子而已。

想知道你自己是由什么组成的吗？宇宙视角下的答案可能比你期待的更大。大质量恒星在其生命结束时发生剧烈爆炸，在火焰中锻造出了各种各样的化学元素，同时将生命所需的化学物遍洒在星系之中。结果呢？宇宙中四种最常见、化学性质最活跃的元素——氢、氧、碳和氮——也正是地球生命体内最常见的四种元素。

我们不光生活在这个宇宙里。

宇宙也生活在我们体内。

甚至有人说，我们不一定来自地球。科学家发现的信息让他们不得不重新思考，我们到底是谁，来自哪里。

第一，正如我们已经看到的，行星遭到大型小行星撞击后，冲击点周围的区域可能发生反冲，将飞溅的石块抛向太空。你可以试试，在床上放个小玩具，然后猛地跳到床垫上，你的冲击产生的能量会迫使玩具弹向空中。小行星撞击产生的巨大能量可能使某颗行星表面的

石块飞向另一颗行星，并在那里安家落户。所以我们才会在地球上找到来自月球和火星的岩石。

第二，一些名叫微生物的小生命能承受太空旅行中极端的温度、压力和辐射条件。如果某些太空岩石来自一个有生命的星球，那么微生物可能安全地藏在那里。

第三，最新证据表明，我们的太阳系刚刚形成的时候，火星还很湿润，那里的环境可能富饶得足以孕育生命。

综上所述，这些发现告诉我们，生命可能起源于火星，然后藏在一块石头里来到了地球。所以地球上的所有住客可能——只是可能——都是火星人的后代。



千百年来，关于宇宙的新发现不断冲击着我们的自我认识。我们曾经认为地球是特别的。然后天文学家发现，我们的母星不过是围绕太阳运行的几颗行星之一。好吧，但太阳肯定是特别的，对吧？直到我们发现，夜空中数不清的星星其实都是太阳。

行吧，但我们的星系——银河系，肯定是特别的。

算不上。因为我们已经发现，天空中那些不计其数的模糊影子都是星系，散落在我们已知的宇宙中。

此时此刻，你很容易觉得我们的宇宙就是一切。但新的理论要求我们对其他可能性保持开放的心态，也许我们的宇宙只是众多宇宙中的一个，也就是说，我们只是一个更大的多重宇宙的一部分。



宇宙视角来自我们对宇宙的认识。但它又不仅仅是你了解的知识，你还得拥有相应的智慧和洞见，足以利用这些知识来评判我们在宇宙中的地位。它的属性一目了然。

☆宇宙视角来自科学前沿，但它不是科学家的专利，而是属于每一个人。

☆宇宙视角是谦逊的。

☆宇宙视角关乎精神，但不是宗教。

☆宇宙视角让我们得以同时把握宏观和微观，宇宙诞生之初比这个句子末尾的句号还小，现在已经膨胀成为直径几十亿光年的庞然大物。

☆宇宙视角让我们对异想天开的念头保持开放的心态，但又不至于开放到失去推理能力、轻易相信别人的说法。

☆宇宙视角让我们睁开眼睛看到真正的宇宙，它不是呵护、关怀生命的温床，而是一个冰冷、孤独、危险的地方，极端的空旷和各种危险天体都能以极快的速度消灭生命。这让我们得以理解所有人类的价值和重要性——甚至包括你烦人的兄弟姐妹和班上的小霸王。

☆宇宙视角让我们看到，地球不过是广阔宇宙中绕轨运行的一个暗淡蓝点。但这个小小的蓝点如此珍贵，至少现在，它是我们唯一的家园——这让我们更珍惜这颗稀有而温暖的星球。

☆宇宙视角不仅让你从行星、卫星和恒星的照片中发现美，也让你学会欣赏塑造了它们的普适定律，包括引力及其他。

☆宇宙视角帮助我们跳出自己所在的环境，意识到生命不只是金钱、名气、衣服、运动，就连分数也不是生命的全部。

☆宇宙视角提醒我们，太空探索不应该成为各国争抢新发现的竞赛，而是全人类共同的任务，所有国家应该联合起来，追求新的知识和经验。

☆宇宙视角不光告诉我们，任何生命都很珍贵，我们和地球上其他生命的共同点比你预想的更多，还让我们明白，或许人类和宇宙中等待我们去发现的其他生命也拥有同样的相似性。

☆宇宙视角让我们看到，组成你身体的原子和粒子广泛分布在宇宙中，所以我们和宇宙是一体的。

我希望你每周——即使不能每天——至少有一次抽出一点时间，想一想那些我们还没发现的宇宙真相。这些秘密正在等待一位聪明的思考者、一项别出心裁的实验或者一次充满创意的太空任务的到来。我们也许还可以想想，有朝一日，这些发现将如何改变地球上的生命。

行星地球上的生命如此匆匆，为了自己和后代，我们应该去探索。一部分原因是探索本身的乐趣：无论是派遣宇航员前往火星，还是向木卫二发射探测器，又或者是其他任务。除此以外，还有一个更高尚的理由：一旦停止对太空的探索，我们很可能倒退回孩子的视角，以为宇宙是围着自己转的，全世界只有一根做成了数字5的蜡烛。

这将终结人类追寻知识和真相的旅程。所以我鼓励你努力去确保不会发生这样的事。人类的未来也许正取决于我们拥抱——而非恐惧——宇宙视角的能力。

名词表

反物质 (antimatter)：物质是指占据空间的任何东西，包括质子、电子和其他基本粒子。每种粒子都拥有和自己处处相反的双胞胎反物质兄弟。但反物质存在的时间通常十分短暂。当质子与自己的反物质兄弟——反质子——相遇，它们会彼此摧毁，爆发出能量。

小行星 (asteroids)：这些太空岩石绕太阳运行，有的像鹅卵石一样小，有的只比行星小一点，就像缩微版的行星，例如直径近1000千米的谷神星。火星和木星之间的小行星带里分布着几万颗这样的太空岩石。恐龙的灭绝就缘于一颗小行星。

原子 (atom)：你看到、触摸到、闻到的所有东西都由原子构成。原子中央有一个原子核，它包含了至少一个带正电的质子，原子核外至少有一个电子绕着它运行。氢是宇宙中最简单也最常见的原子，除了氢原子以外，其他所有原子的原子核都包含中子。

大爆炸 (big bang)：宇宙的诞生。组成星系、恒星、行星和生命的所有物质和能量从一个小得不可思议的空间迅速向外爆发。

彗星 (comet)：太阳系里的这些旅行者是业余爱好者和专业天文学家的最爱，它们由冰和尘埃组成。冰造就了彗星的奇观，彗星靠近太阳时，冰很容易融化，从而形成一道气体和尘埃组成的可见的轨迹。

宇宙微波背景辐射 (cosmic microwave background)：时至今日，宇宙诞生之初的余光仍存留在宇宙中。不过自大爆炸以来，宇宙一直在膨胀，所以这些光也被拉长，变成了更长的不可见的微波。虽

然肉眼看不到这些微波，但我们的望远镜可以测量它们，这为科学家提供了关于早期宇宙的线索。

宇宙射线（cosmic rays）：宇宙中穿梭的这些高能粒子流携带极高的能量。宇宙射线对人类有害，但大气层为我们提供了一道安全的屏障。

宇宙（cosmos）：我们这个广阔、神秘而精彩的世界的另一个名字。一档介绍天体的科学系列节目也以它为题。

暗能量（dark energy）：宇宙膨胀的速度比我们预期的更快，目前我们对引力和物质总量的认识无法解释这一现象。额外的膨胀速度似乎来自一种神秘的力量，科学家将之命名为“暗能量”。

暗物质（dark matter）：通过对遥远星系和星系团的研究，天体物理学家发现，恒星似乎是被这种未知的、看不见的物质聚集起来的。因为我们看不见它，所以科学家叫它“暗物质”。要是你发现了暗物质的真面目，请务必告诉我。

电磁力（electromagnetic force）：宇宙的四种基本力之一，这种力让分子聚合成形，也让电子绕着带正电的原子核运行。

电子（electron）：一种带负电的粒子。据我们所知，你无法将电子分成更小的单位，所以我们叫它基本粒子。

元素（element）：原子的形式多种多样，具体取决于原子核包含的质子数，118种元素组成的化学元素周期表描述了宇宙中所有已知的原子类型。

系外行星（exoplanet）：绕太阳以外的恒星运行的行星。离我们最近的系外行星远在4光年外，也就是说，光需要全速前进整整4年才能到达那里。近年来，科学家发现了数以千计的系外行星。会不会其中有一颗孕育了生命？希望我们能够找到它。

星系（galaxy）：恒星、气体、尘埃和暗物质在引力束缚下组成的集合。

引力（gravity）：宇宙的四种基本力之二。引力的作用不仅是让你的脚踩在地面上。多亏了爱因斯坦，我们知道引力实际上会扭曲空间，将直线弯成曲线。

星系际空间（intergalactic space）：乍看之下，星系之间的这些黑暗空间似乎十分空旷，但这里却藏着许多奇怪的东西，例如流浪恒星和超热气体。见第四章“星系之间”。

轻子（lepton）：宇宙中最早出现的两种粒子之一。轻子热爱孤独，不爱成群结队。最广为人知的轻子是电子。

光年（light-year）：天体物理学家需要面对非常非常远的距离，对我们来说，千米和英里根本不够用。为了描述遥远天体的距离，我们引入了“光年”这个单位，它衡量的是每秒能跑3亿米的光在1年内行经的路程。

物质（matter）：任何占据空间的东西都可以被视作物质，包括你和你周围的所有东西——再加上组成万物的所有夸克和轻子。

中子（neutron）：原子核的成分之一。中子由夸克组成，但它不带电。这种粒子组成的中子星是宇宙中最奇特的天体之一。

原子核（nucleus）：原子的核心，由质子和中子（除了氢原子核以外）组成。

光子（photon）：携带光能的类似波的小包裹。

质子（proton）：原子核中带正电的成分，它由夸克组成，宇宙诞生后大约1秒，质子就已出现。作为宇宙中最简单也是最常见的元素，氢的原子核里只有1个质子。而重元素铁拥有26个质子。

脉冲星（pulsar）：中子星（见前文“中子”）在自转时会发射光束，就像宇宙中的灯塔。

夸克（quark）：你无法将这种基本粒子拆分成更小的单位，夸克有六种形式，和电子一样，它也是早期宇宙中最早出现的物质形式之一。如果没有夸克，就不会有质子、中子、原子，以及其他所有东西。

强力（strong force）：宇宙的四种基本力之三。强力将原子核内的质子和中子结合在一起。虽然它是四种力中最强的，但却只在极短的距离内起效。

弱力（weak force）：宇宙四种基本力中的最后一种。它控制着辐射衰变，也就是原子分裂并将部分物质转化为能量的过程。另外三种力负责结合宏观和微观的物质，而弱力的作用是慢慢将物质分开。

虫洞（Wormhole）：根据爱因斯坦的引力理论推出的最奇怪的概念之一。爱因斯坦发现，引力能扭曲时空，所以我们可以“抄近路”去往宇宙中的另一个地方。谁也没有真正看到过这样的隧道，但很

多杰出的科学家认真思考过虫洞的概念，其中包括爱因斯坦本人。虫洞也是科幻作家最爱的工具之一。

索引

《百位作者反对爱因斯坦》

《星际迷航》

13123 Tyson（小行星）

500米口径球面射电望远镜（FAST）

A

ALMA（阿塔卡马大型毫米波阵列）

AT&T

MK1（射电望远镜）

NASA

X射线

阿波罗任务

阿尔伯特·爱因斯坦

阿尔弗雷德·拉塞尔·华莱士

阿诺·彭齐亚斯

阿塔卡马大型毫米波阵列（ALMA）

埃德温·P.哈勃

矮星系

艾萨克·牛顿

安第斯山区

安东尼·休伊什

暗蓝星系

暗能量

爱因斯坦和暗能量

超新星和暗能量

定义

哈勃和暗能量

理论

宇宙中的暗能量

暗物质

暗物质晕

暗物质之谜

关于暗物质

后发座星系团和暗物质

鲁宾和暗物质

探测暗物质

引力和暗物质

奥尔特云

奥林匹斯山

B

百武彗星

爆炸的流浪恒星，见“超新星”

贝尔电话实验室

比邻星

表面张力

波长

不可见光

伽马射线

各种形式的不可见光

射电望远镜

探测

微波望远镜

钚

C

查尔斯·达尔文

超级英雄，见“浩克”；“超人”

超人

超新星

超人和超新星

超新星1987A

关于超新星

广义相对论和超新星

目击

探测

虫洞

D

大爆炸

大卫·列维

氮

地球

从太空中看地球

大气层

彗星撞击

极地的冰冠

流星和垃圾撞击

特征和地貌

土星和地球的对比

小行星撞击

形成

形状

引力影响

自转

地球大气

第谷·布拉赫

电磁波谱

电磁力

电子

定义

早期宇宙中的电子

作为物质的一部分

多重宇宙

F

反物质

分子

弗里茨·兹威基

G

伽马射线

钢铁侠

鸽粪

汞（元素）

光合作用

光能的各种形式

亦见“宇宙微波背景辐射”；“不可见光”

光年

超人和光年

解释

以光年衡量的系外行星距离

光速

光子

广义相对论

硅

国际空间站

H

哈雷彗星

海登天文馆

海尔-波普彗星

海王星

氦

浩克（超级英雄）

黑洞

恒星

爆炸的流浪恒星

恒星杀手

流浪恒星

双星

形成和凝聚

形状

引力影响

亦见“太阳”；“超新星”

红巨星

红外线

后发座星系团

火星

从火星看地球

光年与火星

火星上的山

火星上的引力

生命理论

月亮形成与火星

J

基本力

亦见“电磁力”；“引力”

甲烷

K

卡尔·G.扬斯基

卡尔·萨根

卡罗琳·苏梅克

卡内基科学研究所

开普勒望远镜

开氏温标

氦星

恐龙

夸克

L

类星体

棱镜

离心力

锂

粒子加速器

流浪恒星

流星

罗伯特·迪克

罗伯特·威尔逊

罗伊·G.比夫

旅行者1号

旅行者2号

铝

氯

M

马克斯·普朗克

玛格丽特·伯比奇

脉冲星

灭绝

冥王星

木星的卫星

N

镎

钠

能量守恒定律

牛屁

诺贝尔奖

O

欧罗巴（卫星）

P

钋

普朗克时期

普林斯顿大学

Q

企业号（飞船）

气体云

强力

乔治·伽莫夫

轻子

亦见“电子”

氢

氰

球体

R

人马座矮星系

弱力

S

上千万开氏度的气体

射电望远镜

生物标记

圣诞老人

铈

双星

水星（行星）

水蒸气

苏联

T

太空垃圾

太空奇观

矮星系

暗蓝星系

爆炸的流浪恒星

流浪恒星

上千万开氏度的气体

探测

真空能量

亦见“超新星”

太空探测器，见“旅行者1号”；“旅行者2号”

太空岩石

太阳

关于太阳的理论

太阳的元素

形成

阳光的解释

太阳系

彗星

流星和太空垃圾

旅行者1号和2号

命名太阳系里的天体

太阳系里的卫星

小行星（见“小行星”）

亦见“月球”；“太阳”

钛

泰坦（卫星）

碳

天王星的卫星

天线，无线电

铁

土星

亦见“泰坦”

钷

椭球

W

外星人

观察地球

来自外星人的信号

识别地球

外星生命形式

物理定律与外星人

与外星人交流

宇宙微波背景辐射与外星人

外星生物学者

望远镜

500米口径球面射电望远镜（FAST）

不可见光和望远镜

开普勒望远镜

射电望远镜（MK1）

作为重要的工具

威廉·赫歇尔

微波能量

电磁波谱中的微波

科学家探测

外星人探测

寻找微波

亦见“宇宙微波背景辐射”

微生物

薇拉·鲁宾

维拉（人造卫星）

温度

测量温度

各种颜色的温度

宇宙的温度

宇宙微波背景辐射和温度

乌拉尼伯营地

乌鸦座（星座）

无线电波

物理定律的普适性

物质

定义

反物质和物质

烹制物质的简单菜谱

物质的形式

X

希腊和罗马神

喜马拉雅

系外行星

细菌

小行星

定义

命名

形成

撞击

星系

“松弛系统”

矮星系

暗蓝星系

暗物质晕和星系

定义

多重宇宙理论

后发座星系团

看不见的物质（见“暗物质”）

名字来源

上千万开氏度的气体和星系

星系碰撞

星系中心（类星体）

形成

遥远的星系

银河（见“银河”）

亦见“星系际空间”

星系际空间

亦见“太空奇观”

星系团

旋涡星系

Y

厌氧菌

氧

大气中的氧

和钛结合

元素

作为生物标记

氧化钛

伊娥（卫星）

铱

宜居带（金发姑娘带）

银河系

“消失的质量”问题

名字

望远镜中的银河

银河系中的矮星系

在宇宙中

亦见“暗物质”

引力

暗物质和引力

定律

行星质量和引力

黑洞和引力

火星上的引力

牛顿引力定律

球体和引力

相对论中的引力

引力常数

作为基本力

铀

宇宙

观测条件

基本力

烹制宇宙物质的简单菜谱

膨胀和冷却

热可可的比喻

形成

宇宙的诞生

宇宙的温度

宇宙视角

宇宙中的神秘力量（见“暗能量”）

宇宙中的智慧生命

作为球体

宇宙常数

宇宙定义

宇宙射线

宇宙视角

多重宇宙概念

火星人理论

实践

属性

思考

智慧生命和宇宙视角

宇宙通行证（太空秀）

宇宙微波背景辐射

定义

发现

解释

验证概念

元素

解释

命名

形成

周期表

元素（专有名词）

不幸的余烬

恒星杀手

恐龙毁灭者

元素中的亚军

孕育生命的元素

众神

重元素

最常见的元素

最受欢迎的元素

元素周期表

亦见“元素”；“特殊元素”

原子弹

原子核

约翰·阿奇博尔德·惠勒

约瑟琳·贝尔

月球

从月球看地球

形成

引力和月球

月球岩石

孕育生命的元素

Z

真空能量

真空压力

正电子

智慧生命

质子

定义

元素中的质子数

早期宇宙中的质子

作为物质的一部分

中国的长城

中微子

中子

中子星

珠穆朗玛峰

卓瑞尔河岸天文台

紫外线（UV）

自转速度

图片来源

碟状星系 NASA (<http://www.nasa.gov>)/ESA(<http://www.esa.int>), The Hubble Key Project Team and the High-Z Supernova Search Team

晴朗的夜空 hellorf.com

焰火星系 NASA (<http://www.nasa.gov/>), ESA (<http://www.spacetelescope.org/>), STScI (<http://www.stsci.edu/>), R.Gendler, and the Subaru Telescope (NAOJ)

NASA/JPL-Caltech

R.Stockli, A.Nelson, F. Hasler/NASA/GSFC/NOAA/USGS

NASA/JPL-Caltech

NASA/C. Reed

NASA, ESA, Hubble Heritage Team (STScI/AURA), J.Bell (ASU), and M.Wolff (Space Science Institute)

NASA, ESA, and the Hubble Heritage (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration. Acknowledgement: Robert A.Fesen (Dartmouth College, USA) and James Long (ESA/Hubble)

NASA, ESA, Z.Levay (STScI) and A.Fujii

NASA

NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute

hellorf.com

ESA/Hubble & NASA

NASA/JPL-Caltech

ESA/Hubble & NASA Acknowledgement: Judy Schmidt

NASA/ESA/G.Bacon, STScI

NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

NASA, ESA, CXC, SSC, and STScI

NASA/CXC/E.O'Sullivan et al.

Simon Waldherr/<https://www.flickr.com/>

X-ray: NASA/CXC/SAO/PSU/D, Burrows et al.; Optical:
NASA/STScI; Millimeter: NRAO/AUI/NSF

NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute

hellorf.com

NASA/GSFC/Arizona State University/Lunar Reconnaissance Orbiter

NASA/Dana Berry

X-ray: NASA/CXC/Univ of Toronto/M.Durant et al.; Optical:
DSS/Davide De Martin

Jarek Tuszyński/CC-BY-SA-3.0&GDFL

Ian Morison, University of Manchester

©ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

NASA/JPL-Caltech

hellorf.com

NASA/JPL

Digitized Sky Survey 2 Acknowledgement: Davide De Martin/Mahdi
Zamani

NASA

(1) 这四种力分别是引力、强力、弱力和电磁力。稍后我们将进一步介绍它们。

(2) Goldilocks zone，出自童话《金发姑娘和三只熊》。——编者注

(3) 果岭（putting green），高尔夫球运动术语，指球洞所在的草坪。——编者注

(4) 莫非我们丢失的所有袜子也去了另一个维度？

(5) 你可以将它缩写为GR，然后你就算是入圈了。

(6) 直到现在也没变。

(7) Dr. Seuss，即希奥多·苏斯·盖索（Theodor Seuss Geisel），20世纪美国儿童文学作家。
——编者注

(8) 抱歉，这完全出于虚构。现实中的钷无法提供近乎无限的能量。钷（见下一页）可能更合适一点，但钷的放射性极强，所以钢铁侠恐怕来不及拯救世界就会身患重病，甚至死掉。

(9) 事实上，地球才是我最爱的行星，土星只能屈居第二。

(10) 除了暗物质以外。不过我们可能也快看到了。

(11) “帕克”（Puck）也有“冰球”的意思。——编者注



未读 Club

为读者提供有温度、有质量、有趣味的
泛阅读服务



专属社群 独家福利
精品共读 活动特权

手机扫码
加入未读 Club 会员计划

未读

• u

NewScientist

全球顶尖科普期刊《新科学家》

科学通识教育读本

U N READ



给忙碌

γ

青少年讲

粒子

物理



揭开万物
存在的奥秘

e



μ



W, Z



暗物质、时空扭转、量子信息.....

探索宇宙是如何在
最小尺度上运作的

欧洲7位前沿物理学教授联袂撰写

从微观世界直至无垠的宇宙，了解万物运行之理

给忙碌青少年讲科学
一本书快速打通一门学科
权威、系统、有趣、高效



ν_τ

版权信息

给忙碌青少年讲粒子物理：揭开万物存在的奥秘

Why the universe exists

作者：英国《新科学家》杂志

译者：秦鹏

出品方：未读·探索家

出版社：天津科学技术出版社

Copyright © New Scientist 2017

Simplified Chinese edition copyright © 2021 by United Sky (Beijing) New Media Co., Ltd.

All rights reserved.

系列介绍

关于有些主题，我们每个人都希望了解更多，对此，《新科学家》（*New Scientist*）的这一系列书籍能给我们以启发和引导，这些主题具有挑战性，涉及探究性思维，为我们打开深入理解周围世界的大门。好奇的读者想知道事物的运作方式和原因，毫无疑问，这系列书籍将是很好的切入点，既有权威性，又浅显易懂。请大家关注本系列中的其他书籍：

《给忙碌青少年讲太空漫游：从太阳中心到未知边缘》

《给忙碌青少年讲人工智能：会思考的机器人和AI时代》

《给忙碌青少年讲生命进化：从达尔文进化论到当代基因科学》

《给忙碌青少年讲脑科学：破解人类意识之谜》

《给忙碌青少年讲地球科学：重新认识生命家园》

《给忙碌青少年讲数学之美：发现数字与生活的神奇关联》

《给忙碌青少年讲人类起源：700万年人类进化简史》

撰稿人

编辑：斯蒂芬·巴特斯比，物理学作家，《新科学家》杂志顾问。

系列编辑：艾莉森·乔治，《新科学家》“即时专家”系列编辑。

本书中的文章基于2016年《新科学家》大师班“粒子物理学的奥秘”上的演讲以及之前发表在《新科学家》上的文章。

特约撰稿人

乔恩·巴特沃斯是伦敦大学学院的物理学教授，也是欧洲核子研究中心大型强子对撞机超环面仪器合作项目的成员。他研究电弱对称破缺的机制，这可以解释为什么一些东西有质量。他写了第2章的“为什么我们需要希格斯”，还有第3章的“探测器的故事”和“大发现”。

迈克尔·达夫是伦敦帝国理工学院理论物理学的名誉教授，也是超引力研究的先驱。他写了第9章的“弦之声”。

戴夫·戈德堡是宾夕法尼亚州费城德雷塞尔大学的物理学教授，专门研究理论宇宙学。他写了第2章的“为什么宇宙是对称的”。

安德鲁·哈里森是英国哈维尔钻石光源公司的首席执行官，也是英国曼彻斯特大学的化学访问教授。他写了第11章的“大显身手的中子”。

尤金·林是伦敦国王学院的理论宇宙学家。从弦论到宇宙中量子信息的作用都在他的兴趣范围之内。他写了第9章的“仍然没有万有理论”。

菲尔·沃克是英国吉尔福德萨里大学的核物理教授。他的研究重点是核异构体。他与人合写了第1章的“原子内部”。

汤姆·韦恩泰曾是伦敦玛丽皇后大学物理与天文学院的公众参与研究员，也曾在欧洲核子研究中心的大型强子对撞机上从事暗物质和磁

单极子的研究。他现在是伦敦大学学院的研究助理。他写了第11章的“粒子物理学为我们做了些什么”。

同时感谢以下作者和编辑：

罗伯特·阿德勒、吉利德·阿米特、阿尼尔·阿纳塔斯瓦米、雅各布·阿荣、斯蒂芬·巴特斯比、迈克尔·布鲁克斯、乔恩·卡特莱特、马修·夏尔莫斯、斯图尔特·克拉克、阿曼达·盖夫特、杰西卡·格里戈斯、丽萨·格罗斯曼、约书亚·豪治戈、汉娜·约书亚、瓦莱丽·贾米森、克斯汀·基德、伊丽莎白·兰度、克里斯汀·萨顿、理查德·韦伯和乔恩·怀特。

前言

从你打开这本书的那一刻算起，已经有数千亿颗被称为中微子的幽灵粒子携带着我们在加速器中制造的任何东西都远远不及的能量穿过你的身体，质子闯入高层大气中，奇异的撞击产物如泻如注、纷落如雨。无数有质量粒子短暂出现而又顷刻即逝，只是为了阻止你的身体以光速分崩离析。

我们对这一切的了解，实乃当今物理学家们聪明才智之明证。他们揭示了太多亚原子世界的秘密；他们发展了我们关于物质和支配物质力量的理论；他们设计并制造了用来一窥物质核心的仪器，并研究出如何破译仪器所发出的复杂而又微妙的信号。

这本即时专家指南将带你进入粒子的领域。它将深入地壳，放眼宇宙，还会回到大爆炸刚刚发生的那一刻。

粒子物理学的目的是，了解事物在基本层面上的运作方式。宇宙中所有事物的基础构件是什么？这些基本实体是如何结合在一起形成更复杂的物质的？又是如何施放我们所感受到的力的？这是一项雄心勃勃的惊人伟业，然而粒子物理学也很简单。它的工作方法包括让事物非常猛烈地相撞，以查明其内部结构和运作方式。见识一下大型强子对撞机吧。它是迄今为止人类发明的最强大的粒子加速器，能够达到的能量之高、探测的尺度之精细、创造出的有质量粒子之多，都前所未有的。

今天，大型强子对撞机已经建成了一座宏伟的理论大厦——粒子物理学标准模型。该模型汇集了所有已知的物质粒子，并描述了它们如何通过另一组粒子携带的几种基本力相互转化和相互作用。我们现在对物质的运行有了深刻的理解，这是建立在数学对称性基础上的，并得到了大量实验的证实。

这为基础物理学的一个章节画上了句号，同时也让我们不禁要问，接下来会发生什么。标准模型中缺少很多东西。从中微子的不稳定行为到暗物质的本质，一系列的粒子谜题正在等待我们去解决。它们会给我们带来某种最终的领悟，还是会留下另外一批更加深刻的问题？

编辑：斯蒂芬·巴特斯比

目 录

[前言](#)

[1 神奇粒子在哪里](#)

[2 玻色子的力量](#)

[3 希格斯制造机](#)

[4 夸克的故事](#)

[5 反物质](#)

[6 与世无争的小家伙](#)

[7 致命的轻量级](#)

[8 超对称粒子以及更多](#)

[9 引力点滴](#)

[10 大型强子对撞机的继任者们](#)

[11 务实的粒子](#)

[结语](#)

[50个想法](#)

[名词表](#)

[注释](#)

[返回总目录](#)

1 神奇粒子在哪里

一个多世纪之前，我们开始把探究的目光投向原子内部。自那时起，我们发现这个世界是由一系列具有独特性质的事物构成的。

原子内部

原子是物质不可分割的终极粒子的观点可以追溯到古希腊的哲学家。它是18世纪以来化学这一新学科赖以建立的基石。但是到了一个多世纪以前，随着更小、更基本的实体——也就是现在我们所称的基本粒子乍露真容，这一切发生了变化。

1897年，英国物理学家约瑟夫·汤姆森正在研究阴极射线——真空中的金属电极在高电压下发射出的辐射流。这些射线是不可见的，但是碰到荧光材料时便会产生辉光。汤姆森证明了，阴极射线在磁场和电场中会偏转，而且偏转的程度与阴极的材质无关。他得出结论：它们是带负电荷的微小物体，比原子小得多，也轻得多。这些“电子”的发现推翻了原子是均质的、不可分割的观点。

如果电子是原子的一部分，那么原子里面还会有什么呢？为了保持原子整体的电中性，汤姆森认为电子是镶嵌在原子里面的，就像是镶嵌在正电荷“布丁”里的梅子。但是，到了1908年，新西兰人欧内斯特·卢瑟福和他在英国曼彻斯特大学的助手汉斯·盖革一起工作，揭示了一幅不同的图景。从放射源发射出去之后，带正电荷的 α 粒子——后来被发现是氦原子核——穿过挡在它们前面的金属箔，路径仅仅偏转了几度。看起来，原子内部大部分空间似乎都空空如也。

盖革和他的学生欧内斯特·马斯登开展的后续实验带来了更加令人意想不到的结果。一些 α 粒子直接反弹，路径折角达180度。卢瑟福后来曾说，这种现象“就像你朝一张纸巾发射了一枚38厘米的炮弹，结果它弹回来打到了你”。卢瑟福于1911年2月首次公开发表的解释是，本

身不到十亿分之一米（ 10^{-9} 米）宽的原子的质量集中在中心一个直径只有 10^{-14} 米的微小体积中。这有点像一只苍蝇在大教堂里嗡嗡乱飞——只不过苍蝇占了大教堂总质量的99.9%。原子核诞生了。

进入原子核

原子核被发现后的一段时间里，它的基本结构仍然是个谜。但是当物理学家们用 α 粒子把一种元素转化成另一种元素时，他们发现会有氢原子核被释放出来。到了20世纪20年代早期，卢瑟福等人确信，后来被称为质子的氢原子核一定是原子核的基本组成部分。但是直到1932年，卢瑟福的同事詹姆斯·查德威克才分离出另一种组成部分。用 α 粒子轰击铍会产生一种新型的辐射，由不带电荷的粒子构成（见图1.1）。起初，查德威克认为它是电子和质子的结合体，结果却发现它有点超重。质子的质量为938.3兆电子伏特（MeV），是电子质量的1800多倍，而新发现的中子质量达到了939.6兆电子伏特。

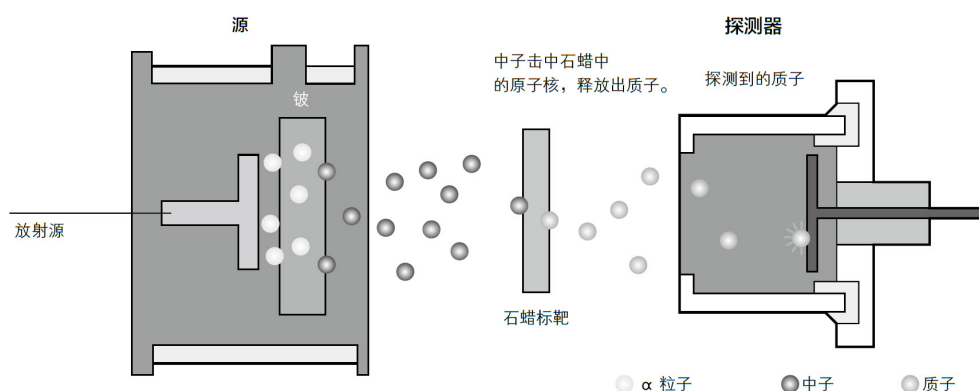


图1.1 中子被发现的过程。在使用 α 射线轰击铍的时候，法国物理学家约里奥-居里夫妇发现了一种神秘的辐射，能够把质子从石蜡中轰击出来。后来发现是中子做到了这一点

单独存在的质子是稳定的，至少人们还没有观察到它们的衰变，而中子则会通过发射电子变成质子。如果你能收集一桶中子，10分钟

后便只能剩下一半了。考虑到这一事实，再加上质子因带正电荷而相互排斥，原子核居然能保持聚合，看起来似乎是个奇迹。这要归功于强核力那压倒性的效应，强核力在极短的距离内能使质子和中子结合在一起（[见第2章](#)）。

有了电子、质子和中子，我们似乎拥有了一套可以形成任何原子的粒子，所有的化学元素乃至所有已知的物质也就得到了解释。新发展的量子力学理论描述了这些粒子的特殊行为：既可以像波也可以像小质点。只需要三种零件就能构建宇宙，这真是一个简单到令人震惊的系统……然而大自然并没有表现出那样的仁慈。

发现反世界

1928年，英国物理学家保罗·狄拉克预言过一种新型的粒子。他为电子设计了一个量子方程。不同于传统的量子力学，这个方程与爱因斯坦描述高速物体运动方式的狭义相对论也是相容的。方程预测电子具有自旋——一种内禀角动量。（电子的自旋是 $1/2$ ——用量子物理学家最喜欢的约化普朗克常数来讲，大概是 10^{-34} 焦耳·秒）它还表明电子应该有一个二重身——一种“反物质”粒子，几乎所有性质都与电子相同，只不过带正电荷而不是负电荷。正电子在1932年被发现，它是第一个被发现的反物质世界成员。此外还有反质子和其他粒子的反物质版本。

与此同时，自然的一个更加奇异的面目也被揭示了出来。当一个中子衰变为一个质子和一个电子（ β 衰变过程的一个例子），两个新粒子的能量加起来要小于一开始的中子总能量。这种短缺致使物理学家沃尔夫冈·泡利和恩里科·费米在20世纪30年代得出结论，肯定还有一

种粒子被发射了出来——一种幽灵般的粒子，与其他粒子之间相互作用很弱。这种粒子现在被称为中微子（具体来说，在上文试验中发射的是反电子中微子）。

在从太空向我们倾泻下来的粒子——也就是宇宙射线——当中，还有更多的意外正等着我们。1937年，在宇宙射线中发现了一个质量相当于电子质量约200倍的粒子。起初，这看起来符合日本物理学家汤川秀树在1933年提出的一项理论。在该理论中，被他称为介子的新粒子利用强大的核力将质子和中子结合在一起。然而，物理学家在20世纪40年代发现，这个新发现其实是电子的一个较重的版本。它令美国物理学家伊西多·艾萨克·拉比发出了疑问：“那东西是谁点的？”

其他这些粒子的存在有何意义？是否还存在着另一个有待发现的层次？为了更深入地研究物质并回答这些问题，物理学家需要开发一些强大的新工具。

粒子对撞

粒子是很小的东西，但是为了研究它们，我们需要巨大的机器。世界上用来研究它们的机器当中，最大、最有名的是瑞士欧洲核子研究中心实验室的大型强子对撞机。这个粒子加速器的隧道有27千米长，峰值耗电量大约为200兆瓦，大约是邻近城市日内瓦耗电量的三分之一。

大型强子对撞机和其他大型加速器的目的是将带电粒子加速到接近光速。这给了粒子很高的动能，也就让它们拥有了强大的撞击力。当这样的高能粒子与其他物质碰撞时，它的能量可以转化为新粒子的质能（根据爱因斯坦的方程 $E=mc^2$ ）。更大的能量意味着你可以创造更重的新型粒子，也使得物理学家能够在非常小的尺度上探测物质，因为亚原子粒子束的行为就像波一样。能量越高，波长越短；波长越短，可以识别的物体就越小。

阴极射线管——汤姆森发现电子时使用的装置——便是一种简单的粒子加速器。将玻璃管内的空气抽空，两端插入电极。施加电压会在电极之间形成电场，负极（也就是阴极）被加热，这样电子就能被有效地“蒸”出来。然后，电子被吸引到正极那端，并在穿过中间的电场的过程中获得能量。

如果电极之间的电势差为1伏特，电子将获得1个电子伏特（eV）的能量，大约等于 1.6×10^{-19} 焦耳。提高电压，你就可以赋予电子更多的能量。一些用于产生X射线的阴极射线管在数百千电子伏特（keV）的能级上工作。

范德格拉夫起电机可以生成更高的电压。这种设备使用一条传送带把电荷向上引入一个金属球中。它们的电压可以达到数百万伏特，因此可以生成带有几兆电子伏特（MeV）能量的质子束。这么高的能量足以探测原子核的结构，但是仍然满足不了粒子物理学家们的要求。

步步高升

人们能够维持的电压是有限的，因此，为了让粒子获得更高的能量，加速器重复使用强度较小的电场。1928年，挪威工程师罗尔夫·维德罗建造了第一台这样的机器，一种线性加速器，或者叫作直线加速器。他的直线加速器令粒子束通过连续的交变电场区域，在粒子行进过程中分阶段给予它们反复加速。一些现代的机器以同样的方式工作，另外一些直线加速器则利用电磁波加速粒子，就像驾驭海浪的冲浪者一样。

世界上最大的直线加速器位于美国加利福尼亚州的斯坦福线性加速器中心国家加速器实验室。这台机器有3千米长。在被用于粒子物理学研究时，它可以将电子加速到500亿电子伏特（50吉电子伏特，简称GeV）。今天它被分成两个区段运作，它的粒子束被用于其他科学领域（[见第11章](#)）。

直线加速器是有极限的，因为粒子很快就会到达终点，你就不能继续加速它们了。这就是为什么当今最强大的加速器——同步加速器——使用磁体将粒子束弯曲成圆形。当粒子加速时，磁场相应地增强，外加电场的频率也随之提高，以跟上粒子的步伐。

粒子束也必须用磁体进行约束，否则粒子就会偏离预定轨迹并击中墙壁。在较大的同步加速器中，长偶极（双极）磁体用于使粒子束弯曲，而四极磁体负责约束粒子束。

现代同步加速器由一个注入器（通常是一部直线加速器）、一个双极和四极磁体环、束流管（带有保持其高真空状态的泵）和几个射频腔组成。它们都是空心的金属结构，其中形成的电磁驻波，提供了用来加速粒子束的电场。

同步加速器的尺寸从1米左右（用作X射线源）到当今世界最大的大型强子对撞机（周长27千米）。大型强子对撞机占据了一条隧道。这条隧道原本是为早期的一台电子同步加速器——大型正负电子对撞机——挖的。这是为了使粒子束的轨迹曲线尽可能平缓，因为高能带电粒子沿曲线运动时，会发出所谓的同步辐射，从而损失能量。当粒子的速度接近光速时，它的轨迹弯曲度越大，辐射量也就越大。在任何给定的能量下，越重的粒子移动速度越慢，因此质子可以在同步辐射消耗其强度之前被加速到更高的能量。例如，大型强子对撞机可以将质子加速到大约7万亿电子伏特，大约是电子在大型正负电子对撞机能够获得的能量的70倍。

等到粒子达到一定的速度，它们就能派上用场了。在一些加速器中，粒子束轰击固体目标，不过两束粒子束正面碰撞的效率要高得多，大型强子对撞机当中正是如此安排的。碰撞产生了大量的新粒子，巨大的粒子探测器跟踪这些残骸，这样物理学家就可以重现碰撞发生时的情况。

粒子探测器

一些探测器只能探测粒子的数量，还有一些能测量粒子损失的能量。最有用的探测器能揭示粒子的轨迹，就像飞机的路径会因天空中的云迹而为人所见一样。如果再加上一个用来偏转带电粒子路径的磁场，路径探测器还可以提供它们电荷和动量的信息。中性粒子通常是通过它们在探测器中相互作用时产生的带电粒子来检测的。

气泡室是最著名的探测器类型之一。带电粒子穿过室内的过热液体时，会离子化原子，一路触发细小气泡的形成。很多人们熟悉的粒子物理学图片都是20世纪70年代在气泡室里拍摄的照片。今天大型强子对撞机里的碰撞图片是利用由很多层探测器构成的巨大仪器产生的电信号生成的，每一层探测器都有着协助确定轨迹和识别产生的各种粒子的特定功能（[见第3章](#)）。

粒子的零件

从20世纪40年代末开始，物理学家们陆续发现一个又一个新粒子，其中许多粒子是由宇宙射线与高空的原子核碰撞产生的。对宇宙射线副产物的研究揭示了 π 介子、K介子和 Λ 粒子存在的最早证据。这些粒子高度不稳定，寿命在 10^{-8} 秒到 10^{-10} 秒之间。然后人们发现了 Δ 粒子和 Σ 粒子，以及后来更多的粒子——100多个看似基本的新粒子，全都不稳定。它们当中大部分都相当重，连同质子和中子一起被统称为强子。粒子物理学家们本来是在寻找物质简单的基本组成部分，结果似乎发现了一个新的亚原子领域，其复杂程度令人惊讶和困惑。

利用粒子加速器在受控条件下模拟宇宙射线的碰撞，物理学家可以对这些粒子进行更加系统的研究。通过这种手段，一种在宏观世界中没有类比的性质被揭示出来，某些强子根据这个性质被打上了不同于其他强子的标记。因为这个性质会导致一些看似奇异的行为，所以这个性质本身就被称为奇异数。在目前提到的粒子中，质子和中子没有奇异数， π 介子和 Δ 粒子也没有奇异数。K介子、 Λ 粒子和 Σ 粒子都有一个单位的奇异数。

在20世纪60年代早期，美国人默里·盖尔曼和以色列人尤瓦勒·内埃曼分别根据强子的电荷、奇异数和自旋（粒子内禀角动量）对强子进行了分类。他们发现了八重道和十重道的模式，这反映了一种被称为SU(3)的数学对称性。

奇异有三

这两个模式中存在着一个缺口，对应一个带负电荷、奇异数为3的粒子。物理学家称它为 Ω^- ，1964年，纽约布鲁克海文国家实验室的一个研究小组使用粒子加速器发现了它——在他们的气泡室里有一条很短但很独特的轨迹。这表明该理论具有一定的预测能力。但是这些美丽的模式背后隐藏着什么样的规律呢？

SU(3)的数学计算表明，较大的组——八重态和十重态——都是由只有3个成员的基本组构成的。或许强子都是由一组更加基础的三种粒子构成的？盖尔曼和另一位美国人乔治·茨威格各自提出，强子确实是由这些基本实体构成的。茨威格称它们为“王牌”，不过我们今天使用的名字来自盖尔曼，他显然喜欢詹姆斯·乔伊斯的小说《芬尼根的守灵夜》中“夸克”(quark)一词的发音。

他们需要三种不同类型的夸克，即上夸克(u)、下夸克(d)和奇夸克(s)，这又叫作夸克的三种味。和所有带电粒子一样，每种味都有电性与之相反的反夸克。通过把三个夸克结合起来，我们可以得到重子，也就是自旋为1/2的强子（比如质子，是下-上-上；或者中子，是下-下-上；或者 Λ 粒子，是下-上-奇）或者自旋为3/2的强子（比如 Ω^- ，是奇-奇-奇）。

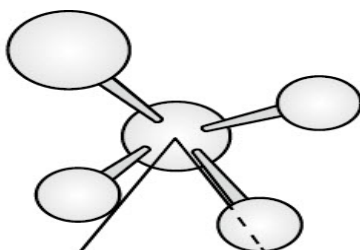
或者，我们可以把一个夸克和一个反夸克（电荷和奇异数正好相反）结合起来，得到自旋为“0”或者“1”的强子。它们叫作介子，包括带电 π 介子（上夸克和反下夸克，或者反过来）和带电K介子（上夸克和反奇夸克，或者反过来）。

夸克真的是粒子吗

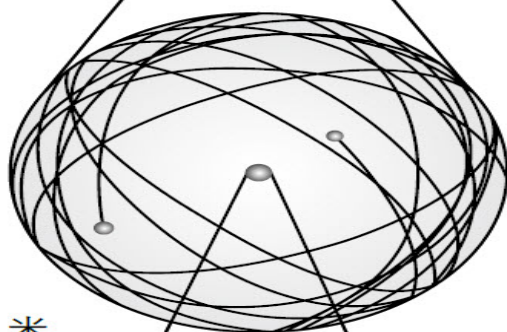
夸克的想法令人难以接受，因为它们的电荷数不是整数。19世纪，迈克尔·法拉第已经证实，电荷总是某种单位电荷的倍数。1897年，汤姆森对电子的发现表明这个单位正是电子的电荷。然而新粒子打破了既定的规则，它的电荷是电子的 $\frac{2}{3}$ 或 $-\frac{1}{3}$ 。这似乎具有革命性的意义，令许多物理学家怀疑夸克会不会仅仅是数学算出来的人工产物，而不是真正的粒子。

但是夸克的真实性很快得到了实验的支持（见图1.2）。已经有证据表明，质子和中子不是简单的球形或者点状物体，因为电子从它们身上反弹的方式很复杂。在20世纪60年代后期，加利福尼亚的物理学家们开展了更深入的研究：他们从斯坦福线性加速器中心3千米长的直线加速器中发射出一束电子，对准液氢标靶，测量了散射电子的能量和方向，以图拼凑出质子的样子。电子在每个质子内部都探测到了微小的点状电荷凝聚：这证明质子确实包含更小的部分。最后，在20世纪70年代早期，日内瓦欧洲核子研究中心的研究人员证实，这些部分携带 $-\frac{1}{3}e$ 和 $\frac{2}{3}e$ 电荷，符合理论物理学家们之前的预测。

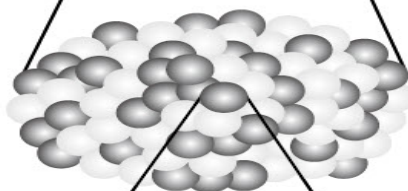
分子
 10^{-9} 米



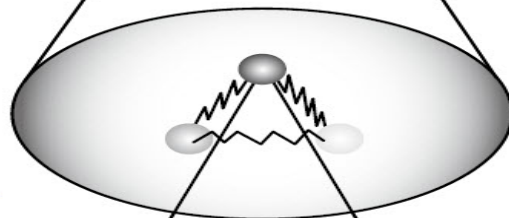
原子
 10^{-10} 米



原子核
 10^{-16} 米



核子
 10^{-17} 米



夸克
小于 10^{-20} 米



图1.2 俄罗斯套娃：构成物质的粒子

1974年，研究正负电子碰撞的实验发现了第四种夸克存在的证据。这种新的夸克更重，后来被称为“粲夸克”。这个名字有些来历：它的存在非常有效地解决了某些特定的理论问题。在英语口语中，“非常有效地”可以表达为“like a charm”，于是它得名“charm quark”，又由于“charm”一词有“魅力”“美貌”之意，它便有了中文名“粲夸克”。第五种更重的夸克，叫作底夸克，于1977年出现在美国伊利诺伊州费米实验室的一项实验中。在那里，实验人员正在研究高能质子与目标碰撞产生的 μ 子-反 μ 子对。这一次，他们发现了一个比质子重10倍的新粒子的证据，这可以解释为一种新的重夸克与它的反夸克结合。底夸克被发现之后，有些人希望把它改名为与“底”（bottom）词首相同的“美”（beauty）夸克，不过最终“美夸克”这个名字虽然有人使用，但是谈不上得到了广泛的认可。最后，在1995年，费米实验室的研究人员发现了第六种夸克，即顶夸克。在顶夸克身上发生了同样的事情：有人希望给它一个与“顶”（top）词首相同的名字，从而不会改变其缩写，而又能够与“美”呼应。他们选择了“真”（truth），结果这个名字接受度还不如“美”，部分原因是，“真”这个字眼在科学和哲学中有着重大的意义，容易让物理学门外汉们误以为这种夸克有什么特别之处。

和奇夸克一样，这三种新的味似乎都有其各自独特的性质。例如，存在一种“粲”介子，它包含一个粲夸克和另一种反夸克。夸克可以从一种变化到另一种，而顶夸克、底夸克、粲夸克和奇夸克都能迅速地衰变为构成普通物质的上夸克和下夸克。

粒子物理学简史

公元前5世纪

古希腊哲学家留基伯和德谟克利特推测物质是由不可分的粒子构成的，它们称为原子。

1897年

约瑟夫·汤姆森发现电子，这是第一种被识别出的基本粒子。

1905年

爱因斯坦提出光是由不连续的能量粒子构成的，后来这些能量粒子被称为光子。

1908—1911年

欧内斯特·卢瑟福的团队发现了原子核。

20世纪20年代早期

卢瑟福等人意识到氢原子核——质子——是所有原子核的组成部分。

1923年

阿瑟·康普顿证实光子的行为像粒子。

1928年

保罗·狄拉克预言电子应该有一个带正电荷的替身：正电子。

1930年

沃尔夫冈·泡利提出 β 衰变中明显缺失的能量是被一种新粒子——中微子——带走了。

1932年

正电子被发现。詹姆斯·查德威克发现原子核的第二种组成部分：中子。

1935年

汤川秀树提出一种理论，认为一种中等重量的粒子——介子——在质子和中子之间传递强力。

1937年

一种质量相当于电子质量200倍的粒子在宇宙射线中被发现。后来人们证实它是电子的较重版本—— μ 子。

1947年

人们在宇宙射线的碰撞产物中发现了 π 介子。这是携带强力的介子的第一个实例。

20世纪40年代晚期至50年代

物理学家们发现了一系列的新粒子，包括K介子、中性 π 介子、 Δ 粒子和 Σ 粒子。

1957年至1959年

朱利安·施温格、西德尼·布鲁德曼和谢尔顿·格拉肖都发表了关于弱核力由重粒子携带的理论。他们的工作基于更早的“规范理论”。

1964年

默里·盖尔曼和乔治·茨威格各自独立地提出了一种基本粒子。盖尔曼称为夸克。

1964年

彼得·希格斯第一个明确预言了赋予质量的玻色子——最终这种粒子被赋予了他的名字。罗伯特·布劳特和弗朗索瓦·恩格勒等人也有过类似想法。

2012年

希格斯玻色子被发现。

1995年

第六种，也是最后一种夸克的味被探测到：顶夸克。

1983年

W玻色子和Z玻色子被探测到。

1976年

一种与电子和 μ 子类似，但是更重的基本粒子—— τ 轻子——被发现。

1973年

量子色动力学从夸克、胶子和色交换的角度描述强力。

1967年

斯蒂芬·温伯格和阿布杜斯·萨拉姆把电磁力和弱力统一成一种“电弱”相互作用。

为什么用能量单位表示粒子的质量？

爱因斯坦的相对论告诉我们，质量和能量被公式 $E=mc^2$ 联系在一起。取一个单位的能量，比如1焦耳，除以 c^2 （ c 表示真空光速），你就能得到相应的质量。在粒子物理学中，一个方便的能量单位是电子伏特（ eV ）——电子（或者质子）穿过1伏特的电势差获得的能量。粒子物理学家既用千电子伏特（ keV ）、兆电子伏特（或者叫百万电子伏特， MeV ）或者吉电子伏特（或者叫十亿电子伏特， GeV ）等单位描述他们可以用加速器赋予粒子多大能量，也用它们描述那些粒子的静止质量。电子的静止质量是 $511keV/c^2$ ，相当于 9.1×10^{-31} 千克。质子的静止质量是 $938MeV/c^2$ ，约等于 1.67×10^{-27} 千克。因为能量和质量基本上是等效的，粒子物理学家们往往忽略掉 c^2 这一因数，直接用 MeV 或者 GeV 来表示粒子质量。

2 玻色子的力量

两类粒子——夸克和轻子，结合在一起形成了物质。还有一类叫作玻色子的粒子约束着它们，并以其他方式支配着它们的生活。

四种基本力

我们已经知道，宇宙宏大的多样性生发自寥寥几种亚原子积木。与此同样不凡的一项发现是，这些粒子相互作用的方式也只有寥寥几种。有四种基本力：引力、电磁力、强核力和弱核力。到目前为止，粒子物理学还远远未能充分地解释引力——在我们能够制造的粒子碰撞中，引力是极其微弱的——不过它改变了我们对另外三种力的看法。用量子物理学的眼光来看，塑造了我们的世界、指引着每一颗亚原子粒子如何舞动的力，本身也是粒子的作用。

电磁力

我们都感受过电和磁的力量。如果你尝试把两块磁铁的北极抵在一起，你会发现两者之间有一种排斥力。在你的毛衣上摩擦一个气球，再把它举到天花板上，气球会被电力吸在那里。

1785年，法国物理学家查尔斯·库仑发现带电物体之间的力遵循平方反比定律（就像一个世纪之前牛顿对万有引力的描述一样）。力 F 与两个电荷 p 和 q 的乘积成正比，与它们之间距离的平方 r^2 成反比。

19世纪，英国科学家迈克尔·法拉第发明了力场的概念。想象一个带电物体悬挂在房间的中央，假设你有另一个具有相同类型电荷的物体，你便可以在房间内的任何一点测量两个物体之间的力。力的方向总是沿着连接两个物体的直线，所以你可以把力的方向画成从中心物体辐射出去的线。

如果我们让铁屑沿着磁力的方向排列，磁铁周围的磁场就会清晰可辨。物理学家也可以用数学的语言描述这些场，用方程给出时空中所有点上力的强度和方向。

电力和磁力是密不可分的。例如，移动的电荷会产生磁效应，而移动的磁极会产生电流。19世纪中期，苏格兰物理学家詹姆斯·克拉克·麦克斯韦将所有的实验结果以及电学和磁学定律提炼成了单一的电磁学理论：四个描述电磁场整体行为的方程。

然而，麦克斯韦定律不足以详细解释原子和分子之间的反应，或者单个原子的结构及其吸收和发射光的方式。为了解释亚原子层次上的现象，我们必须考虑两个新的因素。原子中的电子运动速度很快，所以它们受到爱因斯坦狭义相对论的制约。另外，这是一个由量子力学统治的领域，它赋予了粒子许多违反直觉的属性。例如，粒子就像波一样，可以同时处于一种以上的状态或者位置。因为电子表现为波，所以它们在绕原子旋转时受限于特定的波长，能量因而也就固定了。

将狭义相对论和量子力学结合起来的电磁学理论是量子电动力学，简称QED。它是在20世纪20年代由英国物理学家保罗·狄拉克等人发展起来的，并在40年代得到完善。量子电动力学是一种量子场论。电磁场是量子化的，也就是说，它可以被视为粒子或者量子的集合。所有的相互作用都涉及这些量子的发射和吸收。例如，两个电子通过光子的发射和吸收相互作用。这更像是一场量子接球游戏，光子就是球。

然而，有一个重要的区别。量子球的存在只能是暂时的，否则它将违背能量守恒的基本原理。它只能短暂地存在于物理学家所称的虚

拟状态中。整个过程必须包括这个虚拟粒子的发射和吸收。

比如在量子电动力学中，两个质子通过交换虚光子来相互排斥。但是，虚光子本身可以交换更多的虚光子，要想计算出力的强度，你必须把每一种可能的粒子交换模式都加起来。美国物理学家理查德·费曼设计的简单图表（见图2.1）直观地展现了这些交换。

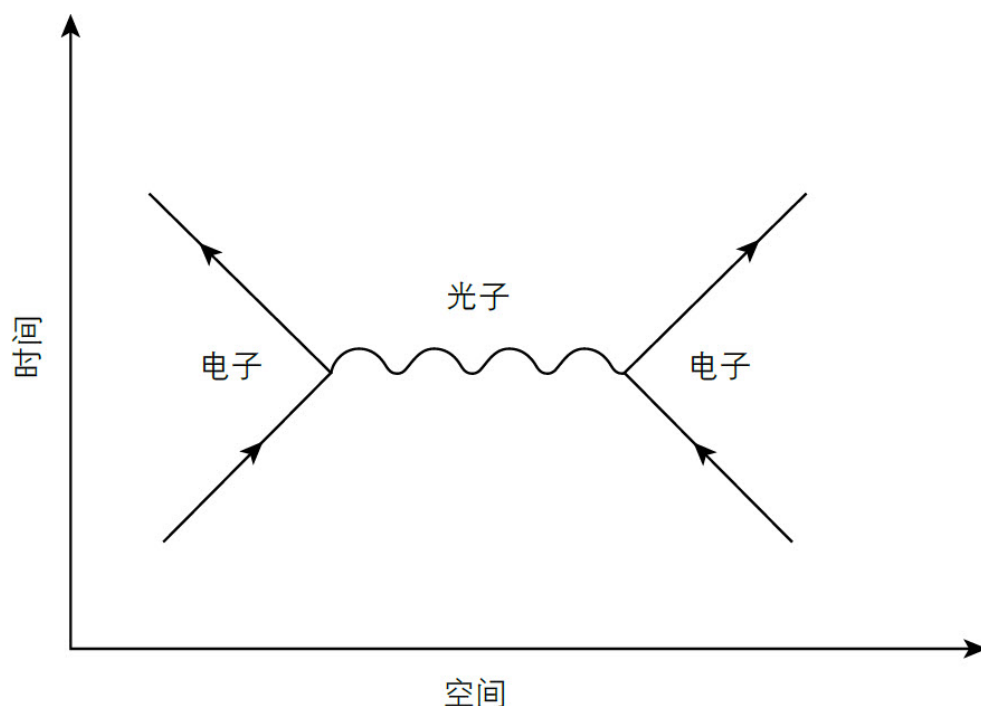


图2.1 这张简单的费曼图表达的是两个电子通过交换一个虚光子互相排斥

强力

在亚原子尺度上，还有两个力在发挥作用。中子和质子之间必须有一种约束力，否则质子之间强大的电斥力会把原子核炸开。这种力在原子核之外没有可测量的影响，因此，与引力或者电磁学不同，它必须被限制在一个非常小的范围内——只有大约 10^{-15} 米。原子核的结合力大约是质子之间电场力的100倍。

它也要复杂得多。加速器实验表明，它并不遵循简单的平方反比定律，而是在最短的距离上表现为斥力，距离增加后表现为吸引力，然后随着距离的进一步增加迅速消失。它也取决于粒子的自旋是如何排列的。或许这并不令人意外。质子和中子是由夸克构成的，它是夸克之间的一种力，这种力间接地产生了质子和中子之间的核力。

夸克有一种类似于电荷的性质，叫作色荷。它与日常意义上的颜色无关，但是它有三种值，分别是红、绿和蓝。就像把三种颜色的光混合在一起会产生白色一样，夸克的三种色荷加起来也会产生无色荷。比如在质子中便是如此，它总是包含一个带蓝色荷、一个带红色荷和一个带绿色荷的夸克。

正如同电中性的原子还是凭借电磁力结合在一起，强力仍然可以令原子核里的质子和中子聚作一团。原子带正电荷的原子核仅仅被它自己的电子云部分屏蔽，与此类似，质子内部带色荷的夸克可以感觉到隔壁质子中夸克的存在。

因为这整套理论是和量子电动力学一样的量子场论，不过涉及的是所谓的色荷，所以被称为量子色动力学，简称QCD。在量子色动力学中，携带强力的粒子被称为胶子，因为它们把粒子粘在一起。

胶子和光子之间有一个重要的区别。光子不带电荷，因此不会通过电磁力直接相互作用（只能通过带电粒子间接作用）。但是胶子有自己的色荷，所以它们之间可以通过强力相互作用。这限制了强力的范围，使它具有十分独特的行为方式。

当两个带电粒子被拉开时，它们之间的力减小。但是当你把两个夸克分开时，胶子会相互拉，力事实上会变大。据我们所知，单独的

夸克永远无法从质子中逸出，它必须始终与其他夸克结合成无色的形式。在碰撞过程中，能量不是以单个夸克的形式物质化，而是以夸克-反夸克对——介子的形式。

只有夸克有色荷。轻子，比如电子，没有色荷，所以它们根本感觉不到强力。

重要的力

- 电磁力的残留效应把电中性的原子结合成分子。
- 电磁力把电子云束缚在原子核周围，保持着原子的完整。
- 强力的残留效应把质子和中子结合成原子核。
- 强力令质子和中子里的夸克结合在一起。

弱力

没有原子核束缚的中子不会永远存在。它很快就会释放出一个电子和一个被称为反中微子的粒子，变成一个质子。物理学家可以用一种叫作弱力的基本力来描述中子的衰变。弱力大约是强力的一万分之一。与人类可以感觉到的引力和磁力不同，它看起来并不像是一种日常意义上的力。不同于其他力在不同尺度上所起的作用——将物质合在一起，弱力的作用是使基本的夸克和轻子从一种类型转变为另一种类型。于是顶夸克可以变成底夸克，或者 μ 子可以变成电子。弱力是唯一能够做到这一点的力。它还会导致放射性的 β 衰变。

弱力的量子场论需要三个载力子。W粒子和W-粒子是带电的，在弱力改变粒子电荷时发挥作用，比如中子衰变为质子时。Z粒子是不带电的，在没有电荷变化的弱相互作用中发挥介导作用。

弱力的这三种载力子都很重，质量大约是质子或者中子的100倍。那么，一个中子是如何发射出比自身重得多的虚拟W粒子或者Z粒子的呢？答案在于量子的不确定性。量子物理学告诉我们，一个粒子的质量（严格地说是质量-能量），甚至是真空中的一点，总是存在一些不确定性。长期来看，这种不确定性很小；但是在短时间内，不确定性很大。一个中子可以凭空产生一个虚拟的W粒子或者Z粒子，只要这个粒子在足够短的时间内被中子或者另一个粒子吸收。


光子是电磁力的场量子，它的静止质量为0，所以虚光子可以无限期地存在，并且可以移动任意距离，这意味着电磁力的范围是无限的。但是W粒子和Z粒子很重，所以不能远离产生它们的粒子。和强力一样，弱力的作用范围很小。

你不可能探测到一个虚粒子。但是在1984年，欧洲核子研究中心的研究人员在超级质子同步加速器中对撞亚原子粒子束，创造出了真实的而不是虚拟的W粒子和Z粒子。这些实验证实了一个惊人的理论预测。20世纪60年代，物理学家谢尔顿·格拉肖、阿布杜斯·萨拉姆和斯蒂芬·温伯格发展了一套弱力的量子场论。该理论表明，在足够高的能量下，电磁力和弱力是一个统一的电弱力的组成部分。因此，当宇宙非常年轻时，宇宙在数十亿摄氏度的温度下充满了高能辐射，W粒子和Z粒子可以像光子一样轻易地被制造出来。

在一个理论中统一两种力的成功鼓舞了物理学家们对“万有理论”的追寻，该理论将能够把电弱力、强力和引力描述成一个基本力的

不同方面（[见第9章](#)）。这种理论也许会揭示时间、空间和本质的本质，并将让人们窥见宇宙鸿蒙之初——所有四种力还无法区分的时刻。

虽然这仍然是一个难以企及的梦想，但是描述电弱力的量子电动力学和描述强力的量子色动力学已经非常强大了。这一理论潜在的对称性（见图2.2）表明存在着6种夸克和6种轻子，正如观测结果所证实。它还预测了W粒子和Z粒子，以及奇怪的玻色子——神秘的希格斯玻色子——的存在。

物质				携力子	
夸克	电荷： $+2/3$	上夸克 u	粲夸克 c	顶夸克 t	光子 γ 电磁力
	电荷： $-1/3$	下夸克 d	奇夸克 s	底夸克 b	W&Z 弱核力
费米子				玻色子	
轻子	质量 增大 	电子 e	μ 子 μ	τ 子 τ	胶子 g 强核力
	电荷： -1				
	电荷： 0	电子微子 ν_e	μ 中微子 ν_μ	τ 中微子 ν_τ	质量之源 希格斯玻色子 H

- 每一种夸克和轻子都有带相反电荷的反粒子与之对应。
- 夸克合成一个介子，要么是三个夸克或者三个反夸克合成一个重子，比如质子和中子。

图2.2 夸克和胶子能够感受强力是因为它们拥有色荷，但是轻子和其他玻色子则不然

这张粒子物理学标准模型中粒子的全员花名册解释了所有可见物质和四种基本力中的三种的运作。

玻色子和费米子

粒子必须遵循量子力学定律。比如说，它们拥有类似波的性质——以量子波函数的形式运动，在空间中伸展，随着能量的增加波长变短。

粒子的很多性质被限定为固定的数值。这些性质被赋予了量子数。自旋是其中之一，其取值只能是基本量子值的整数或者半整数倍。自旋在某些方面类似经典世界中的旋转——它表现出角动量——但是它也有着极其量子化的效应。

拥有半整数自旋的粒子，比如电子、质子或者夸克（自旋都是 $1/2$ ），在其波函数中有一种不对称性。这些统称为费米子的粒子无法共享一个量子态，物质世界因此才会如此繁复多彩。这便是为什么把6个质子、6个中子和6个电子放在一起，就能合成一个有趣的、结构化的碳12原子。

拥有整数自旋的粒子，比如光子（自旋为1），叫作玻色子。这个名字来自印度物理学家萨特延德拉·纳特·玻色。玻色子拥有对称的波函数，可以彼此相安无事地处于相同状态。它们无法构成复杂的物质，而是负起了传递力的职责。

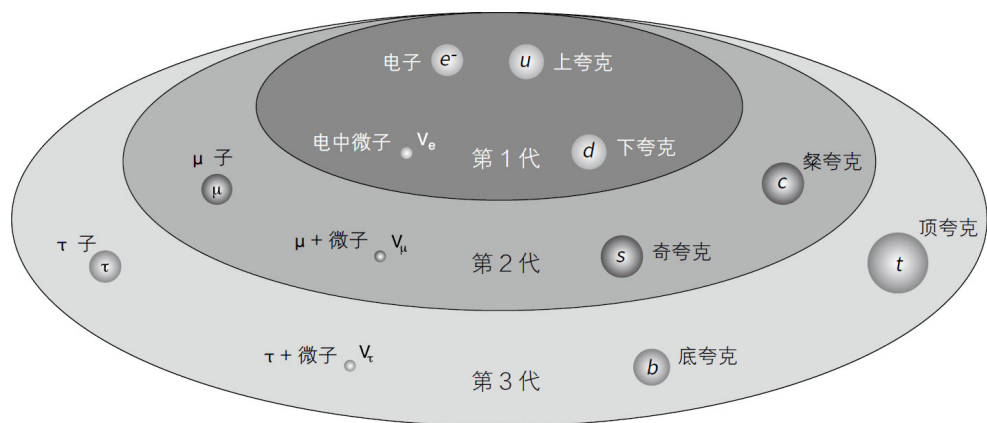


图2.3 根据味和质量，标准模型中的粒子被分成三个族或者代

为什么宇宙是对称的

一个局外人可能会把物理学看作是方程和粒子的泥沼，但是在那些专业人士眼里，它是对宇宙的优雅描述，总是追求尽可能简单。要明白为什么，你需要理解物理学家所说的“对称性”是什么意思，以及被人们遗忘的数学家艾米·诺特惊人的洞察力，后者为后来几乎每一项重大根本性发现奠定了基础。

数学家赫尔曼·韦尔是这么定义“对称”一词的：“如果你能对一件事物做点什么，而在你做完之后它看起来和之前一样，那么这件事物就是对称的。”比如，一个圆可以旋转任意角度，看起来都一样。

对称性是物理定律核心的观点由来已久。亚里士多德及其同时代的人认为，恒星都被粘在天上的球壳上，而行星都沿着圆形轨道运行。当然，他们错了。但是当牛顿用他的万有引力定律来解释行星的椭圆路径时，他引入了一种新的对称性——看不见的引力之手的对称性。引力从像太阳这样的巨大天体出发，向所有方向施以相等的作用。爱因斯坦精确的引力理论——广义相对论，是建立在一个被称为等效原理的对称性上的：一个物体在引力作用下经历的加速度，与其他原因——比如火箭的推进或者离心机的旋转——造成的同样大小的加速度，没有可辨识的区别。

爱因斯坦的工作令人们对对称性在物理定律中发挥的作用产生了极大的兴趣。数学家戴维·希尔伯特和菲利克斯·克莱因意识到艾米·诺特是一位专家，便在1915年邀请她去哥廷根。诺特几乎立即发展出了她的同名定理。用简单的话说，它说的是对称性产生了守恒定律。

诺特定理

守恒定律是物理学的基本原理。它们是数学上的捷径，让我们可以不必重复地计算物理量。不管从哪里入手，你最终都会得到同样的结果。大多数伟大的物理定律都或明或暗地包含了某种守恒的陈述。牛顿第一运动定律粗略地说：“运动中的物体保持运动，静止的物体保持静止。”这就是动量守恒。诺特定理（见图2.4）告诉我们为什么它是正确的。

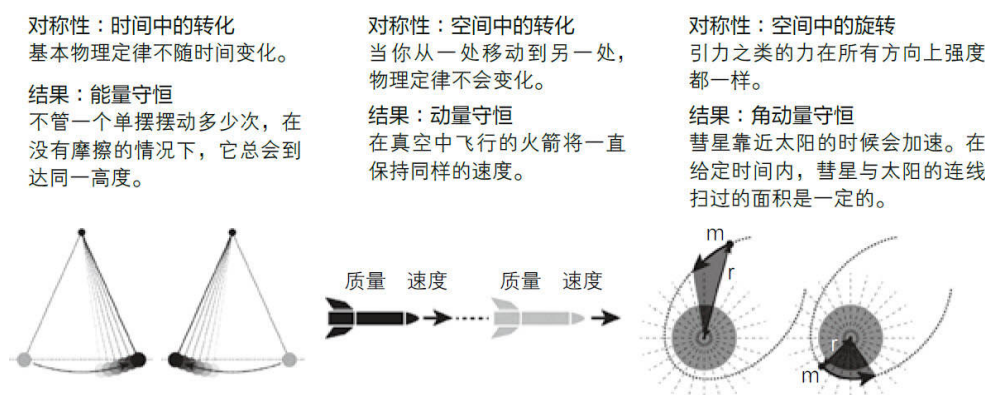


图2.4 对称性在自然界到处都存在：艾米·诺特在1915年提出的理论提供了一种方法，能够将它们转化成可用于计算的定律

想象在一个非常大而光滑的冰湖上放置一枚冰球。无论冰球滑到哪里，湖面都是一样的。把诺特定律应用到那一特定的空间对称性上，它告诉你动量是守恒的。（守恒定律只在对称性成立的条件下成立。冰面上的一个洞会破坏对称性，导致冰球沉到湖底）

什么守恒、什么不守恒，并不总是很明显。在诺特之前，能量被简单地认为是守恒的，这个假设是如此基础，以至于在19世纪它被称为热力学第一定律。但是，如果你进行诺特定理相关的数学运算，你就会发现，能量守恒是因为有一个更基本的对称性：具体来说，就是物理定律不会随着时间而改变。如果它们改变了，能量就不守恒了。

诺特定理是令人们在物理学研究中取得进展的一剂良方。如果你在世界的运作中发现了一项对称性，相关的守恒定律便能让你开始有意义的计算。

空间和时间的对称性也许用肉眼就能看出来，但诺特定理真正的力量来自更模糊的“内部对称性”。对于外行人来说，粒子物理学的标准模型仅仅是一张基本力和粒子的列表。但是如果更深入地看，你会发现它是建立在诺特定理的基础上，对内部对称性的一种表达。

就拿电磁学来说吧。詹姆斯·克拉克·麦克斯韦因为在19世纪60年代将电和磁统一到一个工作模型中而广受赞誉。它的一个假设是电荷既不产生也不消失——诺特定理表明电荷守恒来自对称性。

转个不停

基本粒子有一种叫作自旋的性质，就像在冰冻的湖面上位置不重要一样，自旋的相位不会改变物理计算。把宇宙中的每一个电子都转动一个额外的角度，能量和其他任何东西都不会改变。根据诺特的定理，从这种内部对称性中产生的是电荷守恒。

韦尔进一步发展了相位对称性的概念，他假设每个电子都能被不同程度地扭曲而不改变任何可测量的量。几乎像是变魔术一样，麦克斯韦的四个方程全部出现了。随着标准模型的发展，兴趣对称性变得更加微妙，但诺特定理一直是不断给予的礼物。

驰骋在电线里为电器提供动力的电子，以及每秒钟以万亿之巨的数量穿透我们的身体而不留一丝痕迹的中微子，很难想象这二者在某种意义上都是相同的粒子。中微子主要通过弱力相互作用，而这种力

也控制着太阳内部的核聚变。但是弱力与粒子是电子还是中微子无关：把它们调换一下位置，弱相互作用是一样的。这种对称性产生了一种被称为弱异位旋的量的守恒。就像电荷一样，它可以用来标记粒子并预测它们的行为。

在20世纪60年代，研究人员发现，在后来所谓的电弱理论中，电磁力和弱力实际上可以由一种潜在的对称性产生，这是标准模型的基石（见图2.5）。高能状态下，对称性没有被破坏，电子和中微子的行为是相同的。在今天已经冷却了的宇宙中，对称性被打破了，电子和中微子的行为因此而改变，另外还有一种新的粒子产生——我们现在知道的希格斯玻色子。

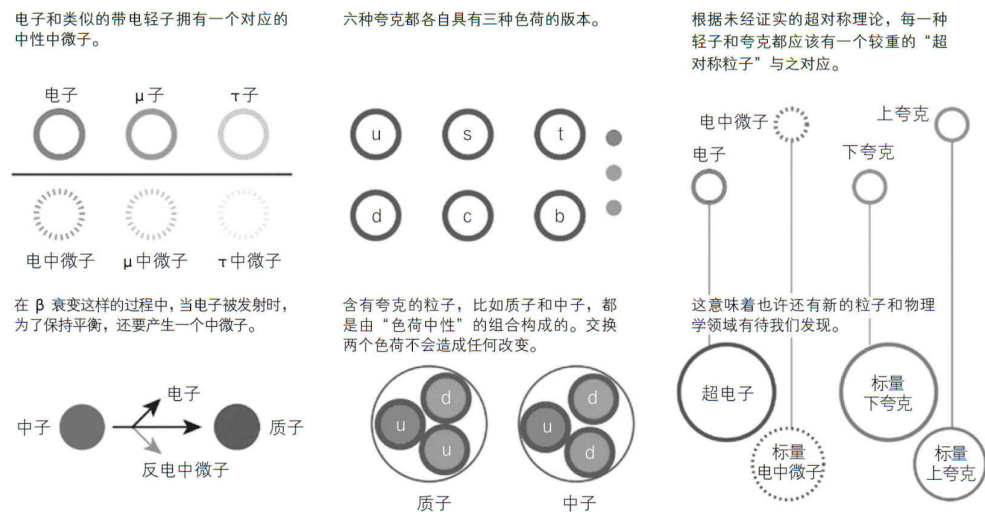


图2.5 粒子物理学标准模型以及以后可能出现的更新理论的有效性由某些微妙的对称性决定

标准模型的另一根支柱是强相互作用，它将单个的质子和中子结合在一起。组成这些粒子的夸克被标上了红色、绿色和蓝色三种色荷之一。把所有的色荷改变一个单位，所有的强相互作用将保持完全相同。这种对称性导致了色荷的守恒，这一原理限制了哪种粒子可以存在，以及哪种衰变过程可能发生。

粒子物理学的新理论是以对宇宙基本对称性的有根据猜测为基础建立的。圣杯是大一统：发展可以用短短几个方程描述一切理论的动力。几十年来，理论物理学家们认为，这种最终的对称应当包括所谓的超对称，所有的费米子都有对应的重玻色子，所有的玻色子都有对应的重费米子（[见第8章](#)）。创造并观察这些对应粒子的需求是建造大型强子对撞机的主要动机之一。从正确的角度来看，它就是一台观察对称性的大机器。

性别不对等

艾米·诺特的成就得到了广泛的认可，她本人却饱受学术界传统偏见的困扰。1882年，诺特出生在一个杰出的数学家家庭。她的父亲马克斯是巴伐利亚北部埃尔朗根大学的教授，而她一开始却因为身为女性被禁止在这所大学学习。

诺特最终获得了一个学士学位和一个博士学位，然而仍然没有一所大学愿意聘用她。在接下来的10年里，她成了对称性方面的世界级数学专家，但是没有职位、薪水和正式的头衔。甚至在被邀请去哥廷根工作时，工作邀约也是不带薪水的。她以客座讲师的身份服务了7年，直到在1922年获得了荣誉性的“卓越”教授职位。

与此形成鲜明对比的是，20世纪20年代同在哥廷根的赫尔曼·韦耳，尽管资历不及诺特，却很快获得了杰出教职。“获得这样一个比她还高的职位令我感到羞愧。我知道，作为数学家，她在很多方面都比我强。”他后来评论道。

1933年，为了躲避纳粹的迫害，诺特离开德国，来到美国宾夕法尼亚州的布林摩尔学院，两年后死于癌症手术的并发症。爱因斯坦在她死后写道：“诺特小姐是自从女性开始接受高等教育以来最具创造力的数学天才。”有些人也许会说这句话中“自从”那一部分是多余的。数学家们崇敬她，然而尽管她为现代物理学奠定了基础，物理学家们却倾向于忽视她的贡献。

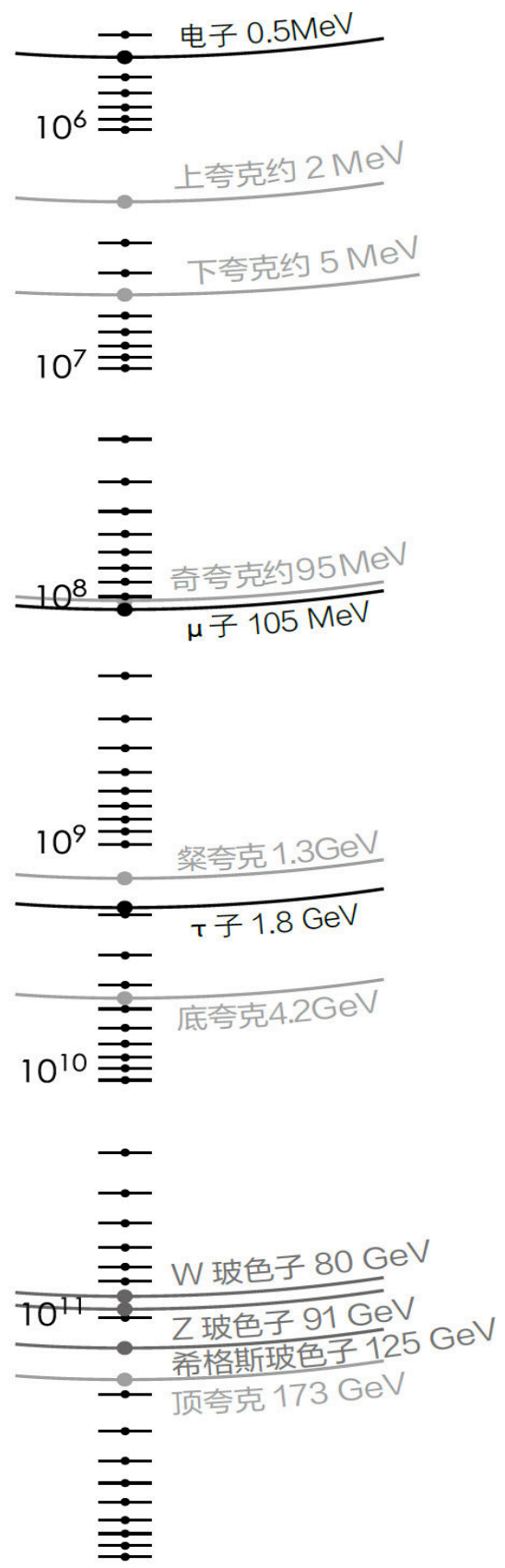
为什么我们需要希格斯

标准模型（见图2.2）是我们描述现实的理论当中最成功的。它描述了物质粒子——费米子——如何感受力，以及如何通过其他粒子——玻色子——的交换相互作用。但是几十年来，一个重要的组成部分因其缺失而引人注目：希格斯玻色子。人们认为这种粒子起着两个重要的作用：赋予其他粒子质量，以及解释为什么自然的力呈现它们所呈现的样子。

如果你把物质打破成越来越小的碎片，无论从什么开始，你最终得到的都会是一堆粒子，比如电子和一群夸克——构成质子和中子的、较轻的上夸克和下夸克，及其短命的表亲——奇夸克、粲夸克、底夸克和顶夸克。电子属于另一个由6种粒子组成的家族：轻子。该家族其他成员包括它的两个较重的兄弟—— μ 子和 τ 子，以及3种几乎没有质量、分别与前述3个成员结伴的中微子。这12种物质粒子统称为费米子，各有一种除电荷相反外完全一致的反粒子。就是这些。就我们所知，物质不能进一步被分解了。

这一整洁的模式符合实验结果，但是隐藏了一个复杂的问题。所有物质粒子都有一种叫作“质量”的性质——对速度和方向改变的抗拒。它们的质量范围跨越了11个数量级，从轻量的电中微子到巨大的顶夸克（见图2.6）。这些质量来自哪里——为什么它们如此不同？

- 带电轻子
- 夸克
- 玻色子 (携力子)



单位：电子伏特 (eV)

图2.6 基本粒子的质量。三种中微子（电中微子、 μ 中微子和 τ 中微子）的质量非常小，比1电子伏特还小得多，没有在这张图上展现出来。光子和胶子没有质量

这个问题的意义远远超出了在粒子物理学领域为粒子列名单。如果没有什么东西来提供质量，就不会有我们所知道的物质。无质量的夸克和电子会以光速永远运动，不可能接受束缚组成质子、中子和原子。

根据标准模型，费米子通过被称为玻色子的其他粒子传递的力相互作用。光子依附于电荷并携带电磁力，而胶子感受到色荷产生强核力。

至于标准模型的第三种力，弱核力……嗯，它很弱，但是如果没有它，令太阳和其他恒星光芒万丈的放射性衰变就不会发生。它之所以那么弱，是因为它的载体W玻色子和Z玻色子拥有非常大的质量——几乎是质子质量的100倍。制造这样的粒子需要很多能量。在正常情况下，如果可以的话，物质粒子更倾向于通过交换无质量的光子来相互作用。

在非常高的能量下——例如，在宇宙最初的那一刹那，或者在强大的粒子加速器的碰撞中——这种差异会消失。W粒子和Z粒子变得无质量，就像光子一样，而在我们的日常体验中，如此迥异的电磁力和弱力变成了统一的电弱力。

电弱力分裂成电磁力和弱力的过程被称为电弱对称性破缺，这一定发生在宇宙早期的某个时刻。不管是什么引起的，这都与神秘的质量有关。毕竟，这也正是W玻色子和Z玻色子获得质量的机制。

会发生对称性破缺的不只是奇异的力。一个日常的例子是液体冷却成固态晶体。在这一情形中，一个大致对称的状态（液体中的一切在所有方向上看起来都是一样的）被一个不太对称的状态所取代。在这个状态中，事物在不同轴向上看起来明显不同。

20世纪60年代，粒子理论物理学家们开始怀疑，用来描述这种对称性破缺的工具是否可以应用于冷却中的宇宙。这不是一件容易的事。固体或者液体中的分子相互作用可以通过参考一组固定的坐标来定义，但是根据爱因斯坦广义相对论的时空扭曲，宇宙中不存在这样的标准参照系。

1964年，比利时理论物理学家罗伯特·布劳特和弗朗索瓦·恩格勒提出了一种量子场的方程式。这种场能够以一种符合相对论的方式打破对称性，从而使粒子获得质量。英国物理学家彼得·希格斯也提出了同样的建议。他指出，这个场中的褶皱会以新粒子的形式出现。同年早些时候，杰拉尔德·古拉尔尼克、卡尔·哈根和汤姆·基布尔把这些想法结合成一个更现实的理论，这便是标准模型的前身。

希格斯场的关键在于，就连空间的最低能态也不是空的。在空间中运动的粒子与场有不同程度的相互作用，这就给它们的运动创造了一种“黏性”：质量。W玻色子和Z玻色子通过与这个场的一种相互作用获得质量，而费米子通过另一种相互作用获得质量。因为希格斯场没有净电荷或者色荷，光子和胶子根本不与之相互作用，便保持着无质量。

这是一个巧妙的设想。为了查明它是否成立，我们需要给这个场狠狠的一击，让它晃动起来，从而显露真容。这些晃动可以使希格斯玻色子被观察到。理论和实验的发展让我们对所需的能量有了一个准

确的估计：希格斯玻色子的质量必须在1000亿到4000亿电子伏特之间。我们需要一部真正巨大的粒子加速器。

夸克-胶子火球的声音是什么样的？

实验室里制造过的最热的物质发出一种诡异的嗡鸣声。与此差不多的声音也许曾经回荡在大爆炸刚刚过后的宇宙中，那个时候，太空还是一大锅炽热翻腾的物质浓汤。

这种实验室物质是在美国纽约州阿普顿的相对论重离子对撞机里创造的。这部加速器将金粒子碰在一起，打碎原子乃至构成原子的质子和中子，令其破解成更小的夸克和胶子。产生的火球——叫作夸克-胶子等离子体——温度高达数万亿摄氏度，模拟出了宇宙诞生一百万分之一秒时的状态。随着这一“小爆炸”产生的火球冷却，单独的夸克和胶子结合成各式各样的大粒子。

纽约布鲁克林普拉特学院的物理学家阿涅斯·默克希及其同事计算出了，对于在其内部的一个观察者而言，这团夸克和胶子构成的火球会发出什么样的声音。通过分析大约300万次碰撞得到的测量结果，团队确定了火球的总体聚集程度——也就是它们的粒子分布得有多么紧密。

密度的起伏就相当于声波，因此研究者们研究了粒子的分布如何随时间演变，来确定声音如何变化。接下来，他们必须把声音的波长乘以大约1000亿亿，才能使其进入人类的听力范围。在得到的音轨中，随着火球的膨胀，以及密度降低造成的声速变化，低音越来越占据主导地位。大约在一半的位置出现了一次声调的起伏，标

志着夸克和胶子重新结合，组成了从质子到 π 介子在内的各种粒子。

在 如 下 网 址 ， 你 可 以 收 听 这 条 音 轨：
www.newscientist.com/article/dn18998-what-does-the-hottest-matter-evermade-sound-like/

3 希格斯制造机

瑞士日内瓦附近的大型强子对撞机是有史以来最大的物理实验装置。通过研究与大爆炸早期相近的条件，它可以解决一些科学上最深邃的谜团，并把我們带入粒子物理学的新领域。它在2008年9月投入使用，4年后揭开了标准模型的最后一部分——希格斯玻色子。

大型强子对撞机简介

跨越法国和瑞士边界的大型强子对撞机被设计用来回答一些关于宇宙的最深奥的问题。质量的起源是什么？为什么我们是由物质而不是反物质构成的？暗物质是由什么构成的？关于宇宙最早期的环境——当时四种自然力还被统一为一个超力，大型强子对撞机也可以提供一些线索。

为了找到这些问题的答案，大型强子对撞机在一条圆形隧道里把质子加速到光速的99.9999991%，然后在环上的四个位置将它们击碎，每个位置都被一部巨大的探测器包围着。碰撞能量是14万亿电子伏特，是其前身——美国伊利诺伊州巴达维亚的费米实验室——的7倍之多。

在日常生活中，这点能量并不算大。一只飞行中的蚊子便有大约1万亿电子伏特的动能。大型强子对撞机的特别之处在于，这些能量集中在一个不到一粒尘埃的1万亿分之一的区域。大型强子对撞机的能量密度之大，使它重现了类似大爆炸之后 10^{-25} 秒时的情况，也就是塑造我们宇宙的粒子和力刚刚形成的时候。掌握了那么大的能量，大型强子对撞机应该能够创造出实验室里前所未见的大质量粒子。

没错，它已经成功地发现了希格斯玻色子——人们认为其他所有基本粒子质量都是这种粒子赋予的。但是物理学家们还希望有更多的发现，包括将为建立超越现有标准模型的新物理学指明道路的超对称粒子。最轻的超对称粒子也是暗物质的一个有希望的候选者。暗物质是一种不可见的实体，被认为占宇宙总质量的80%多。一些理论物理

学家推测还有更多古怪的发现有待大型强子对撞机揭开，包括更多维度、迷你黑洞、新的力以及比夸克和电子还小的粒子。尽管大型强子对撞机还未曾取得这些成果中的任何一个，但它们仍有可能在未来几年内出现。它还在寻找物质和反物质之间的细微差别，研究一种被称为夸克-胶子等离子体的奇异物质状态，这可能会揭示，大爆炸火球中的夸克和胶子是如何凝结成了我们今天看到的质子和中子。

大型强子对撞机或者其他粒子加速器会制造出吞噬地球的黑洞吗？

2008年，美国的活动人士试图推迟大型强子对撞机的启动，声称它可能会产生毁灭整个地球的小型黑洞。这样的机器真的有可能产生黑洞吗？

答案是否定的。如果大型强子对撞机中产生了黑洞，它们将在 10^{-26} 秒内蒸发，这一过程是由英国物理学家斯蒂芬·霍金首次描述的。即使霍金是错的，也就是说黑洞不会蒸发，我们也有理由感到安全。来自外太空的宇宙射线携带的能量要远大于大型强子对撞机产生的能量，而且数十亿年来一直与太阳系的行星发生碰撞，没有造成任何问题。更重要的是，宇宙射线的碰撞远远多于大型强子对撞机的碰撞。木星、土星或者月球并没有被黑洞吞噬。

超级机器的建造

长27千米的大型强子对撞机是世界上最大的机器。它将质子束加速到接近光速，并在每秒内令它们迎头相撞6亿次。然而大型强子对撞机最显著的特征也许是它的温度。大型强子对撞机的温度只有1.9开氏度（也就是零下271.25摄氏度），是宇宙中与之体积相当的物体当中最冷的……除非某个外星文明建造了一台更冷的。

如果没有这蚀骨的极寒，大型强子对撞机可能会遭遇超导超级对撞机一样的命运，后者在20世纪90年代初走上了成为世界最强大加速器之路。超导超级对撞机的设计是让质子以40万亿电子伏特的能量相互撞击。这需要超导磁体产生的强磁场来弯曲和聚焦粒子束（[见第1章](#)）。超导超级对撞机团队决定不去推进相关技术，而选择了一种已经在其他加速器中得到应用的超导磁体。这种磁体由液氦冷却至4.5开氏度（也就是零下268.65摄氏度）。这些磁体很强大，但还是比不上为大型强子对撞机研发的那些更冷酷的家伙——这被证明是一个致命的弱点。较弱的磁体无法将高能粒子的路径弯曲成一个足够小的圆，因此超导超级对撞机的隧道周长必须达到87千米。建造那么大一台机器的成本很高，超导超级对撞机在1993年被美国政府下马。超导超级对撞机在得克萨斯州沃克西哈奇附近部分完成的隧道现在被废弃了。

为了避免类似的失败，位于瑞士日内瓦附近的欧洲核子研究中心决定将大型强子对撞机塞进现有的一条位于地下100米深处的隧道中。这条隧道是在20世纪80年代为大型正负电子对撞机建造的。人们往往把它说成环形，但它实际上更像个圆角的八边形。设计人员选择了一个没那么有野心的峰值能量：14万亿电子伏特——仍被认为足以带来

丰富的物理学发现——和新一代铌钛超导线圈。将这些线圈冷却到1.9开氏度，它们便可以传输更大的电流，产生机器所需的超强磁场。不过这也是有代价的。在那个温度下，液氦变成了超流体，可以毫无黏滞地滑过微小的裂缝，所以管道系统中成千上万的焊缝必须达到核电站的标准。

大型强子对撞机是被黄鼠狼搞垮的吗？

不——其实是一只石貂。那是在2016年4月26日，星期五的早上，这个生物咬坏了一台66千伏的变压器，导致整个欧洲核子研究中心断电。一开始在日志里，它被称为鼬鼠，后来被更准确地确定为石貂。这种动物与鼬鼠算是亲属，不过体形较大。对撞机花了一个星期才恢复工作。那只石貂则永远地停止了活动。

这一事件让人想起了2009年一则被广泛报道的故事：一只鸟把一块法式面包掉在了大型强子对撞机的一个变电站上，导致了它的断电——然而这件事从未得到证实。

超环面仪器和紧凑 μ 子线圈

供粒子束飞行的通道只是这部伟大机器的一部分。为了弄清楚粒子碰撞时会发生什么，人们在圆环周围安装了四台探测器（参见下面的“探测器故事”）。超环面仪器是其中最大的一个，它重达7000吨，用来追踪从碰撞中飞出的粒子。这些粒子当中最重要的是 μ 子，测量它们动量的方法是在磁场中弯曲它们的路径。由于大型强子对撞机的强大能量，这些 μ 子比以前对撞机产生的那些更高能、更迅速，所以

磁场必须非常强，于是超环面仪器装备了世界上体积最大的超导磁体。

为容纳这个庞然大物而挖掘的洞穴必须有35米高。由于容积太大，在周围密度更大的岩石中间，它就像水中的气泡一样上浮，尽管速度极其缓慢。它每年向上移动约0.2毫米，地板必须厚达5米，以确保它不会在上升时翘曲。

为了交叉验证超环面仪器的发现，还有一个名为“紧凑 μ 子线圈”的“一把抓”捕捉实验使用不同的技术寻找相同的粒子。它也给建设者们提出了挑战。当质子在探测器内碰撞时，余波会轻微地干扰其他质子在环内的运行路径。为了尽可能地减轻这种影响，探测器之间的距离必须尽可能地远，因此紧凑 μ 子线圈被安置在了与超环面仪器恰好相对的位置，位于侏罗山脉的底部。这很麻烦。首先，工程师们必须挖两口60米深的竖井，一口用来安装电梯，另一口用来下放探测器。然而他们发现，这片区域由松散的砾石沉积物组成，当中有水流过——挖掘无望。于是他们冻结了地面。

他们钻出了一系列的管道，并在其中循环零下5摄氏度的盐水。然后，在一个月的时间内，他们令管道里充满了零下196摄氏度的液氮。这就形成了一层3米厚的冰质挡墙，防止地下水在工人挖掘干土的时候流入。

与此同时，紧凑 μ 子线圈的工程师们在研制世界上最强大的超导磁体，其强度是超环面仪器的两倍。这个重达1万吨的磁体是由超导线圈构成的，而磁体4特斯拉的磁场（大约是地球磁场强度的10万倍）产生的外扩力相当于60个大气压，线圈必须能够承受得住。没有一家公司，也没有一个国家能够完成这项工作，因此磁铁的线圈历经8年完成

了一次欧洲之旅，从芬兰开始，经过瑞士、法国和意大利，最后到达欧洲核子研究中心。

至关重要的是，整个大型强子对撞机和它的探测器必须从一开始就能够顺利运行，因为一旦系统启动并运转起来，修理它们就远远没有那么容易了。修理意味着让大型强子对撞机恢复到室温，这需要大约5周的时间。之后，它4万吨的磁体将需要冷却至1.9开氏度，这一过程又需要5周时间，需要近1万吨液氮和130吨超流体氦。毫不奇怪，质量控制必须非常严格。

如果说大型强子对撞机的硬件本身是革命性的，那么收集、检查和存储结果数据的计算机系统也不遑多让。每一次高能碰撞都会喷射出大量的粒子，这些粒子需要被追踪和识别。全部记录是不可能的，所以智能软件进行了取舍，丢弃了超过99.99%的碰撞。即便如此，大型强子对撞机的四个实验每年也将产生1500万吉字节的数据。为了应对这一冲击，工程师们不得不创建迄今为止最复杂的数据处理和分析系统之一——全球大型强子对撞机计算网格，它连接了40多个国家大约170个计算中心。

探测器的故事

大型强子对撞机的四个大型探测器（ATLAS、CMS、LHCb和ALICE）都是同轴圆筒结构。离碰撞点最近的圆筒由半导体制成。当一个带电粒子通过这种材料时，它释放出原子周围束缚比较松散电子，形成一种显示粒子路径的电流模式。探测器周围的磁体使带电粒子的路径发生弯曲，而弯曲的程度显示出粒子的动量。

下一层圆筒主要是基于液态氙（在超环面仪器中）或者钨酸铅（紧凑 μ 子线圈）的探测器。在这些探测器中，由于撞上了密集排列的原子，大多数粒子的运动被阻止，并产生了光子。这些光子可以用来测量每个粒子的能量，从而识别它们。

这些探测器阻止不了 μ 子，它们要由更外层圆筒中的专用探测器识别和测量。与其他粒子相互作用很弱的中微子根本不会被探测到。人们要将碰撞中产生的所有其他粒子的动量加起来，并观察有没有什么东西得不到解释，才能推断出中微子的存在。

许多同时发生的质子相撞的产物会以接近光速的速度飞离，有待仔细研究的碰撞需要尽快被挑选出来，因为再过25纳秒，便会有另外一群质子在探测器的中心碰撞。

在进入大型强子对撞机的主环之前，
质子或者粒子要先经过一系列用来把它们加速到更高能量的机器。

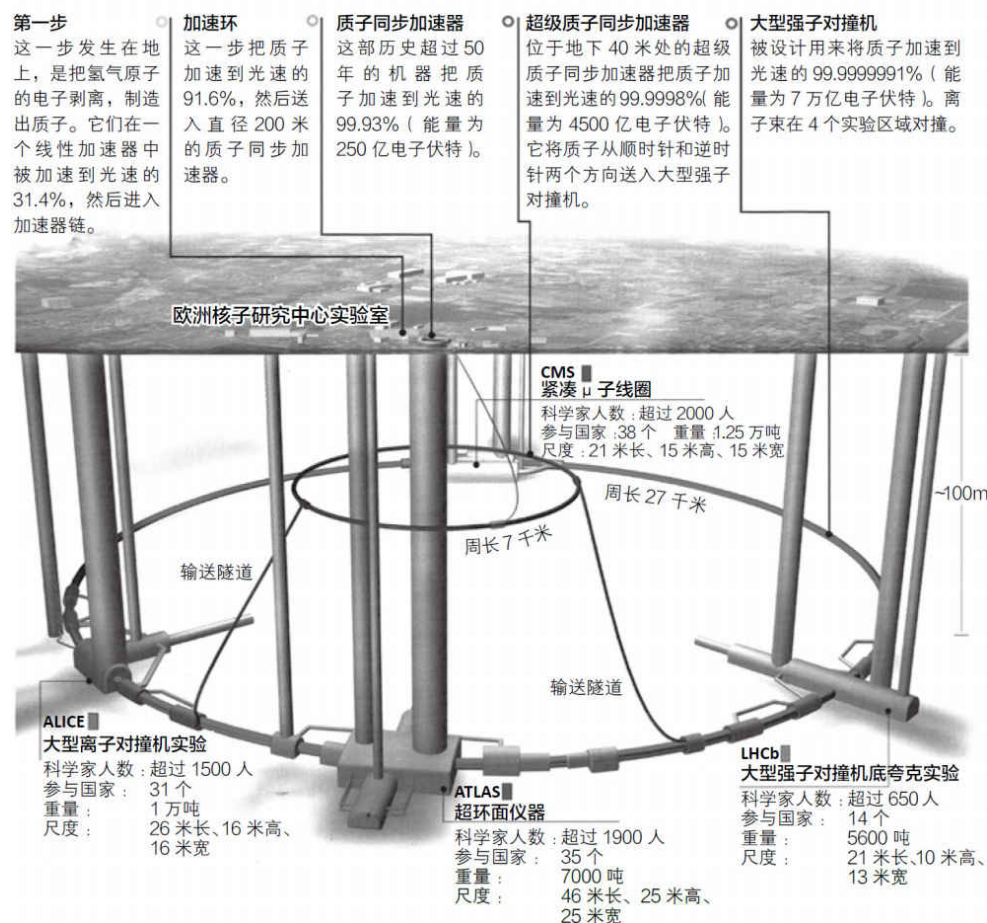


图3.1 大型强子对撞机加速朝相反方向运行的质子（或者铅离子）束，让它们在4个地点迎头相撞，巨大的探测器在那些位置分析碰撞产生的碎屑

采访：掌管世界上最大实验的女人

意大利物理学家法比奥拉·吉阿诺蒂于2016年成为欧洲核子研究中心的总干事。2009年，就在她接任超环面仪器负责人之前，《新科学家》杂志采访了她。

你为什么决定成为一名粒子物理学家？

我是从与物理几乎没什么关系的领域转行过来的。当我还是个小女孩的时候，我喜欢艺术和音乐。我曾在一所音乐学院刻苦学习钢琴，高中时选择的课程包括文学、古希腊语和拉丁语等语言、哲学和艺术史。我喜欢这些科目，但我也是一个非常好奇的小女孩。我被那些大问题吸引住了。为什么万事万物是这个样子的？回答基本问题的可能性一直吸引着我——我的思想，我的精神，我的一切。所以当我不得不选择自己的人生方向时，我认为物理学可以比哲学更具体地回答这些大问题。我想对了，因为我现在很快乐。

你对成为大型强子对撞机粒子物理实验的首位女性负责人有什么想法？

欧洲核子研究中心是一个如此丰富的环境：这里有来自世界各地的人，年轻的学生与著名的科学家还有诺贝尔奖得主一起工作。所以地域、年龄和性别在这里无关紧要。我并不觉得女人领导一个大型科学项目有什么特别的。另外，作为一名在超环面仪器这样的大型实验中获得了一定知名度的女科学家，我希望我可以给那些考虑投身科学事业的年轻女性带去鼓舞。

麻烦介绍一下超环面仪器的大小和范围。

有来自169个机构的近3000名物理学家在这里精诚合作。它是迄今为止在粒子对撞机上建造过的最大的探测器。参观它所在的地下洞穴时，人们会立即被它壮观的体积所震撼——它有五层楼那么高。除了规模，它还有着宏大的复杂性。我们需要记录1亿个独立的电信号，以重建质子对撞中产生的数百个粒子。粒子的运动轨迹必须精确到微米级。惊人的规模、复杂性和精确性给我们带来了巨大

的技术挑战。超环面仪器和大型强子对撞机的其他探测器都是史无前例的仪器。

超环面仪器的主要目标是什么？

超环面仪器将筛查由高能质子碰撞产生的粒子。我们正开始一场奇妙的科学之旅。我们相信，在这样的能量尺度下，新的物理学应该会出现，超越所谓的标准模型（它解释了所有已知的粒子和作用于它们的力）。我们希望找到一些基本问题和谜团的答案，其中许多问题已经困扰了我们几十年。例如，质量的起源是什么？这个问题与希格斯玻色子的存在有关。除了我们已知的四种自然力之外，还有其他自然力吗？还有更多的空间维度吗？宇宙中的暗物质是由什么构成的？

你个人希望超环面仪器首先发现什么？

暗物质。如果我们发现了能让宇宙20%的成分得到解释的粒子，我会非常非常高兴。像大型强子对撞机这样的加速器让我们能够研究极致的小——物质的基本成分，这可以让我们了解宇宙的结构和演化，凸显了极致的小和极致的大之间的联系。

你有没有想过如果大型强子对撞机没有做出新的物理学发现会怎么样？

这是个好问题，但是很难回答。根据我们从过去几十年的实验和理论工作中学到的，在大型强子对撞机能够提供的能量尺度上，一定会有一些新的东西。也许只有一个希格斯玻色子，或者有一个新的机制扮演同样的角色，但是我们还有着更多的期待。我们知道标准模型并非完整的基本粒子理论，因为它回答不了我们所有的问

题。我们预计它将在大型强子对撞机的能量级别上开始失效。那里一定有新的物理学。也许它们不是我们心中所想的答案，但是肯定会有答案。大自然很可能会给我们带来惊喜，这将是最令人兴奋的可能性之一。毕竟，所谓研究，无非就是寻找我们原先不知道的东西。

在超环面仪器工作是什么感觉？

大型强子对撞机和超环面仪器之类实验装置的建造是一场史无前例的科学、技术和人文开拓。作为一名科学家，我在欧洲核子研究中心的生活如此特别的原因主要有三点。一是激动人心的物理科研目标。二是，为了解决这些问题，我们必须开发高科技仪器。这些仪器汇集了各个领域的前沿技术，从电子到低温，还能对社会产生附带效益。三是，这些项目是在国际环境下开展的，我们有来自世界各地的物理学家、工程师和技术人员，通过科学把各国联系在一起，打破政治障碍。在我们的项目中，有些人员分别来自历史上的非友好国家。

大型强子对撞机和超环面仪器可能揭示一些关于宇宙如何运行的深刻真相。想到这一点时，你有什么感受？

当然是兴奋的感觉，以及意识到我们距离对人类来说非常重要和伟大的东西已经非常近了。基础研究是人类的责任和需要。13世纪的意大利诗人但丁说过，我们的存在不是为了像动物一样活着，而是为了追求美德和知识。对基础研究和知识的追求是我们的需要，这将我们与动物或者蔬菜区分开来。这就像对艺术的需求。研究带来知识，知识带来进步，向来如此。

如果我们在大型强子对撞机上发现一些基本的东西，那就有点像是进入宇宙的中心。在你越来越接近基本原理，接近宇宙从何而来、往何处去这样的基本问题时，你会有一种非常特别的感觉。

大发现

2012年7月，大型强子对撞机团队宣布他们终于发现了希格斯玻色子——不过他们并没有直接观察到它。希格斯玻色子是短命的，几乎在瞬间衰变为其他粒子。要推断它的存在，你必须测量那些衰变产物，并证明它们来自希格斯玻色子。

希格斯玻色子真的应该叫这个名字吗？

2012年，一个物理会议的组织者要求将希格斯玻色子改称为BEH或者标量玻色子。名字的改变可能看起来很深奥，但这暗示了复杂的过往以及确定这个粒子的发现应该归功于谁的困难。

要想理解这个问题，我们要把时间倒回50多年前。与大多数科学进步一样，这个难题的解决并不是由某个人单枪匹马实现的。1961年，芝加哥大学的南部阳一郎的研究工作引出了这样一个观点：在早期的宇宙中，一个提供质量的场横空出世，而在那之前，宇宙中只充满了无质量的粒子。

1964年8月，比利时布鲁塞尔自由大学的罗伯特·布劳特和弗朗索瓦·恩格勒（布劳特和恩格勒便是BEH中的“B”和“E”）解决了理论中的一些问题，并详细阐述了一种机制。然而首次明确预测了我们现在称为希格斯粒子的，是英国爱丁堡大学的彼得·希格斯——在1964年10月发表的一篇论文中。

这一过程解释了为什么会有人提出“BEH玻色子”选项。但是另一些人倾向于取一个不具名的名字——标量玻色子，或者复杂一点——BEHHGK玻色子，这个名字含有对迪克·哈根（Dick Hagen）、杰拉尔德·古拉尔尼克和汤姆·基布尔贡献的认可，他们在1964年发表了一篇关于质量传递机制的论文。

还有人指出，粒子的命名似乎都挺将就的。“这跟名字由一个委员会精挑细选的元素不一样。”得克萨斯大学奥斯汀分校的诺贝尔物理学奖得主斯蒂芬·温伯格说。携带弱力的Z玻色子就是他命名的。

幸运的是，关于希格斯粒子，标准模型预测了我们需知道的一切，不只是精确的质量。对于每一个可能的质量，我们都可以预测大型强子对撞机应该产生多少颗粒子，以及它们将衰变成什么。例如，希格斯粒子有时候应该会衰变为一对高能光子。光子对有许多可能的来源，但是如果我们重点关注那些看起来可能源自希格斯玻色子的，并在直方图上标出它们的合计动量，便会有一颗被称为“隆起”的未知粒子凸显出来——与特定质量相对应的过量事件（见图3.2）。这正是超环面仪器和紧凑 μ 子线圈在大约1250亿电子伏特的质量上看到，并于2012年7月4日向世界宣布的希格斯玻色子。

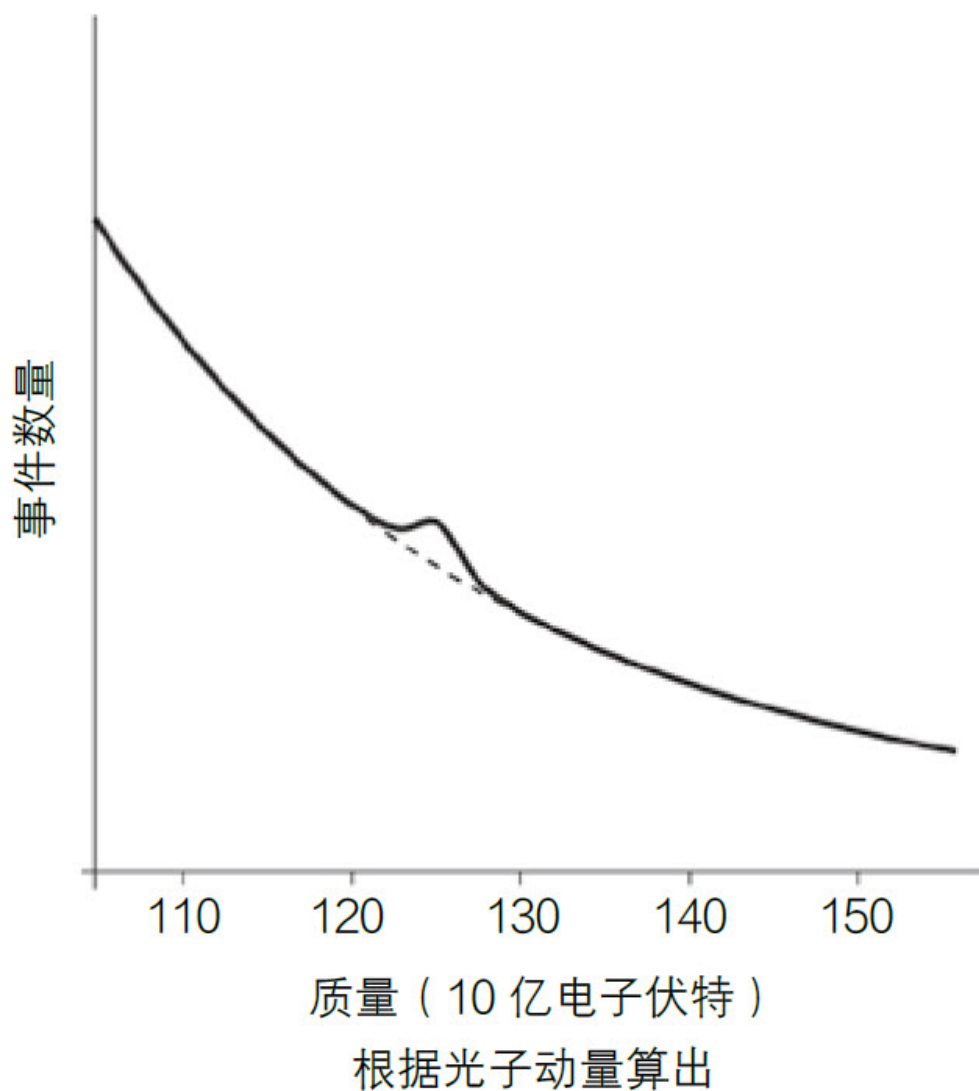


图3.2 通过测量大型强子对撞机中碰撞产生的光子对的动量，揭示出一个可疑的突起——一种新粒子的证据

这并不是唯一的证据。根据预测，希格斯玻色子有时也会衰变为两个Z玻色子，每个Z玻色子进一步衰变为两个轻子。这些轻子的动量加和产生了与光子数据相同质量的峰值。以W玻色子为产物的衰变也能提供证据。W粒子衰变为中微子，而中微子是无法探测到的，所以在没有明确的质量突起。不过，我们观察到的W粒子衰变要比预期的希格斯玻色子不存在的情况下多。

事实上，新粒子衰变为W玻色子和Z玻色子的速率与标准模型对希格斯粒子的预测大致相同。所以我们掌握的观测数据足以令我们认为它差不多就是希格斯玻色子。但是我们仍然不能确定它是不是标准模型所预测的希格斯粒子，甚或是更有趣的东西。

自2015年大型强子对撞机再次启动以来，它一直在探索这种新粒子的几个特性。虽然我们相当肯定，新粒子会像标准模型对希格斯粒子的预测，衰变为携带力的玻色子，但是对于产物为制造物质的费米子的衰变，我们就不那么肯定了。升级后的大型强子对撞机一直在测量这些产物为底夸克、 τ 子甚至 μ 子的希格斯衰变。

最有趣的问题与粒子的质量有关。在标准模型中，希格斯粒子与自身以及周围粒子之间的相互作用似乎意味着它应该有巨大的质量。大型强子对撞机发现的粒子却要小得多。人们可以通过“微调”标准模型来恢复秩序。调整事物，使两个大的数字几乎（但不完全）相互抵消，留下一个小质量的希格斯粒子。许多人对这个修正不满意，认为它让这个理论显得有点不自然。这个问题的一个流行解决方案是超对称性，即通过费米子和玻色子之间的对称性扩展标准模型。超对称性至少会产生5种不同的类希格斯粒子。然而到目前为止，在大型强子对撞机中还没有发现超对称粒子的迹象，造成一些人对这个解决方案产生了怀疑（[见第8章](#)）。希格斯粒子较轻的问题仍然是个谜。它甚至可能给我们的宇宙带来灾难（[见第7章](#)）。

黑暗希格斯

被认为赋予了其他粒子质量的希格斯玻色子也可能是暗能量的来源。暗能量是一种奇怪的力量，正在导致宇宙越来越快地分崩离

析。

当希格斯玻色子被发现时，研究人员希望能在它的行为中观察到一些异常，使他们能够用新的理论替换掉无法解释暗物质等现象的粒子物理学标准模型。到目前为止，它一直都循规蹈矩得令人沮丧，不过也许它的存在本身就提供了通往新物理学的道路。

标准模型的场产生了一定的能量密度。这种能量密度渗透到宇宙中，使宇宙以越来越快的速度膨胀。比起我们通过观测星系相互远离测量到的暗能量的值，这一暗能量密度要大得多。

希格斯粒子如何解决这个难题？与标准模型中的其他场不同，希格斯场是标量场——它的作用没有特定方向。甚至在希格斯粒子被发现之前，位于坦佩的亚利桑那州立大学的物理学家劳伦斯·克劳斯就一直在怀疑，是否存在其他可以与希格斯粒子相互作用的标量场。

克劳斯和拉法耶特路易斯安那大学的詹姆斯·登特设计了一个能够做到这一点的新标量场。标准模型认为，所有基本力的场在极高的能量状态下应该会合并，这意味着存在一个统一的、高能量的场。新标量场的能量密度为0，但它可以利用希格斯粒子连接到这个高能场，在这个过程中获得自身的能量。

精确的量由“跷跷板机制”决定：一个场的能量上升，另一个场的能量便会下降。由于统一场能量如此之大，所以新标量场能量将非常小。克劳斯和登特发现，它正处于适合解释暗能量的量级。

采访：“上帝粒子”背后的人

彼得·希格斯是英国爱丁堡大学物理学荣誉教授。1964年，他与布鲁塞尔自由大学的罗伯特·布劳特和弗朗索瓦·恩格勒共同提出了一种新的粒子，可以用来解释其他基本粒子是如何获得质量的。2013年，他与恩格勒共同获得了诺贝尔物理学奖。2012年，他的同名粒子被发现一周后，《新科学家》杂志采访了他。

希格斯玻色子被发现的消息有没有让你感到意外？

在这一切发生前一周，我在西西里的一所物理暑期学校。我没有带瑞士法郎，我的旅行保险在我应该飞回爱丁堡的那一天到期了。随着时间的推移，流言开始满天飞，但是直到宣布消息的那个星期六，我们才确切地知道有事情发生。我们接到了欧洲核子研究中心前理论物理负责人约翰·埃利斯打来的电话。他说：“告诉彼得，如果他周三不来欧洲核子研究中心，他很可能后悔。”我说：“好啊，那就去呗。”

你当时感觉如何？

非常兴奋。好消息是在欧洲核子研究中心研讨会的前一天晚上得到最终确认的。我们在约翰·埃利斯家吃晚饭，他开了一瓶香槟。

上周三在研讨会上宣布这一消息时，那显然是一个激动人心的时刻。

在研讨会上，一位记者问我为什么在演讲结束后突然哭了起来。在演讲过程中，我仍然在心理上与这一切保持着距离，但是当

研讨会结束时，就像在一场足球比赛中主队获得了胜利。人们纷纷为演讲者起立鼓掌，又是欢呼又是跺脚的。人们的热情仿佛浪涛一般击倒了我。

你是怎么庆祝的？

在回伦敦的航班上吹了一罐“伦敦骄傲”麦酒。

48年前，你提出了一种解释质量存在的机制，在那个过程中预测了希格斯玻色子。但是你关于这一课题的第一篇论文遭到了拒绝，你的许多同行一开始都认为你的想法是错的，斯蒂芬·霍金打赌说玻色子不会被发现。你觉得自己被证明了吗？

是的，嗯，有时候说对了的感觉也是蛮不错的。刚开始的时候，我没期望能在有生之年看到这件事情发生。随着大型对撞机——大型正负电子对撞机、万亿电子伏特加速器以及现在的大型强子对撞机——被一一建成，情况开始发生变化。一开始，没有人知道希格斯玻色子的质量是多少，它也许太重了，所以这些对撞机发现不了。

你曾经怀疑过这个粒子的存在吗？

不，没有怀疑过。它对机制的一致性至关重要。作为一种理论演练，你可以把这种粒子移除，但是接下来理论就解释不通了。我对这个机制背后的理论很有信心，因为它的其他重要方面都在一代代对撞机中得到了详细的验证。如果整幅图景剩下的部分不存在，那将是非常令人惊讶的。

人们提出了几种类型的希格斯粒子，分别适配粒子物理学的不同理论。你喜欢哪一种？

我是超对称的拥趸，很大程度上是因为，它似乎是能将引力纳入整套体系的唯一途径。它可能仍然不够，但是它朝着把引力纳入进来的方向。有了超对称性，就会有更多这些粒子。那将是我喜欢的结果。

你一直不喜欢做科学名人。有没有一种如释重负的感觉，有没有抱着一种也许现在这种关注会逐渐消失的希望？

当然有一点如释重负的感觉。对我来说，过去几天的喧闹才刚刚结束，很难算是已经从中走出来了。我最大的期望，我想，是一些安静的时间。目前来看，这种可能性不大。我的收件箱和门垫里塞满了电子邮件和信件。有人希望我为他们的希格斯棋盘游戏代言，有人希望我去他们的新办公室中庭走道落成典礼做嘉宾。甚至还有一家巴塞罗那的小啤酒厂，想知道我最喜欢喝什么啤酒，这样他们就可以酿造类似的啤酒来纪念我。这太疯狂了。

考虑到你的同行们都在呼吁授予你骑士头衔和诺贝尔奖，现在看来没有迹象表明你会回归平静的生活。你考虑过下一步会发生什么吗？

这个嘛，到了10月份，诺贝尔奖宣布的时候，我可能会患上诺贝尔奖得主谢尔顿·格拉肖所说的“诺贝尔症”。就是心神不宁那种感觉。

在这么多的关注下，你有没有办法用简短的一句话解释希格斯粒子机制？

不，我花了更多的时间告诉人们，物理学家的解释是无稽之谈。我反对的一点是，一个粒子获得质量就像在糖浆里面拽它。（在这个过程中，你会失去能量）问题是，当我试图用我喜欢的方式来解释它时，理解这个解释所需要的18世纪物理学很多人都还没有掌握。我把它解释为有点像光通过介质时的折射。

我在1964年提出的模型其实就是发明了一种相当奇怪的介质，它从各个方向看起来都是一样的。它产生的折射比光在玻璃或者水里的折射要复杂一点。这是一种波的现象，但是你可以挥挥手并默念爱因斯坦和德布罗意（de Broglie，这两人提出了波粒二象性的观点）的神奇名字，把它翻译成粒子的语言。

因为几个人几乎在同一时间提出了这个机制，这个粒子的命名问题一直是一个雷区。你现在怎么称呼它？

我搞不懂它怎么能继续被称为希格斯玻色子。我认为它只会变成H玻色子。希望在粒子物理学中，人们不会把它和氢混淆起来。我的确有时候还是会叫它希格斯玻色子，那是为了让人们知道我在说什么。我不叫它“上帝粒子”。我希望以后这个名字不会像最近这样被使用得那么频繁。我一直在告诉别人，这是别人的笑话，不是我的。

不过，这个标签让这种粒子听起来很容易理解。

那倒是，然而它的含义就是会误导人。它会导致一些不知道这个称呼来源的人说一些相当愚蠢的话。我听过一些有神学背景的人试图从这个角度来理解它。他们不明白这个名字只是个玩笑，从来就没有被认真对待过。

为什么希格斯玻色子经常被称为“上帝粒子”？

把希格斯玻色子称为“上帝粒子”会招致许多物理学家的愤怒。这个词源于诺贝尔奖得主利昂·莱德曼。他在费米实验室的粒子加速器奋力推动对希格斯粒子的搜寻工作，并写了一本书介绍自己的研究。据莱德曼说，他想把它叫作“那个该死的粒子”，然而出版商把“该死的”（*goddamn*）缩写成了“上帝”（*god*）。

4 夸克的故事

按重量来算，你主要是由夸克和胶子组成的。这些粒子以奇怪而复杂的方式结合在一起，但是我们现在有能力以比从前高得多的精确性计算它们的行为——从而开始回答有关我们自身存在的一些基本问题。

与夸克死磕

如果让科学迷说出他们心中的愿望，许多人可能会说：生命、宇宙和一切的答案。要是这一点得不到满足的话，那就来一把功能齐全的光剑吧。这样说来，媒体上很少能见到有可能把这两个心愿都满足的科学领域的报道，就显得很奇怪了。如果我们能真正掌握乏味的质子和中子，我们就能开始解释物质宇宙是如何形成并持续存在的，还能探索令人难以置信的技术，比如新型激光和储能材料。

质子和中子的主要区别是质子带正电荷，而中子是电中性的。但是它们的质量其实也略有差异。中子重9.396亿电子伏特，质子重9.383亿电子伏特。这一差异仅有0.14%，却关系重大。超出的质量意味着中子可以衰变为质子，反之则不然。稳定的质子可以与带负电荷的电子结合，形成稳健的、有结构的、电中性的原子。如果质子更重一些，它们就会衰变为中子，世界就会变成一摊平淡无奇的中子汤。

中子和质子质量差的确切数值也很关键。最简单的原子是氢，它是一个质子加上一个轨道上的电子。氢是在大爆炸中产生的，后来成为第一批恒星的核聚变燃料，其他大部分化学元素都是在恒星核聚变中形成的。除了氢之外，所有的元素都含有中子。如果质子和中子的质量差稍微大一点，聚变就会更困难，因为在原子中加入中子会面临更大的能量障碍。宇宙会被卡在氢那一步。

然而，如果质量差稍微小一点，氢就会在宇宙形成的最初几分钟内聚变成氦，那就不会有什么燃料来驱动像我们的太阳这样的长寿恒

星了。如果进一步缩小质量差，氢原子就会崩溃：质子就能吃掉围绕它运行的电子，变成中子，然后吐出中微子。那样就没有原子了。

它们是从哪儿来的？

如果质子和中子的质量并非恰好是这些数值，我们就不会存在。但是质量从何而来的问题却难以回答。我们在半个世纪之前就已经知道，质子和中子——统称为核子——不是基本粒子，而是由称为夸克的更小粒子构成的。夸克有六种类型：上夸克、下夸克、奇夸克、粲夸克、底夸克和顶夸克。质子的组成是上-上-下，而中子是上-下-下。

下夸克比上夸克略重，但是这并不能解释中子质量略大于质子质量：两种夸克的质量都很小。很难说它到底有多小，因为夸克从来没有单独出现过，但是上夸克的质量大约是200万或者300万电子伏特，下夸克的质量可能是它的两倍：这只占了整个质子或者中子质量的极小部分。

像所有的基本粒子一样，夸克通过与无处不在的希格斯场（大型强子对撞机便是将这种场搅扰得足够猛烈才产生了可被探测到的希格斯玻色子）的相互作用获得这些质量。不过要想解释由多个夸克组成的物质的质量，显然还需要别的东西。

为了找到答案，我们必须勇攀量子色动力学的峭壁悬崖。正如粒子具有决定其对电磁力作何反应的电荷一样，夸克携带着三种色荷中的一种。色荷解释了它们经由强核力的相互作用（[见第2章](#)）。量子色动力学是用来描述强核力的理论，它极其复杂。

夸克通过交换胶子结合在一起形成质子和中子等物质。胶子没有质量，但是有能量。根据质能转换方程 $E=mc^2$ ，能量对应着等价的质量。另外，胶子的交换还会在每个核子内产生大量短命的夸克-反夸克对——虚介子。

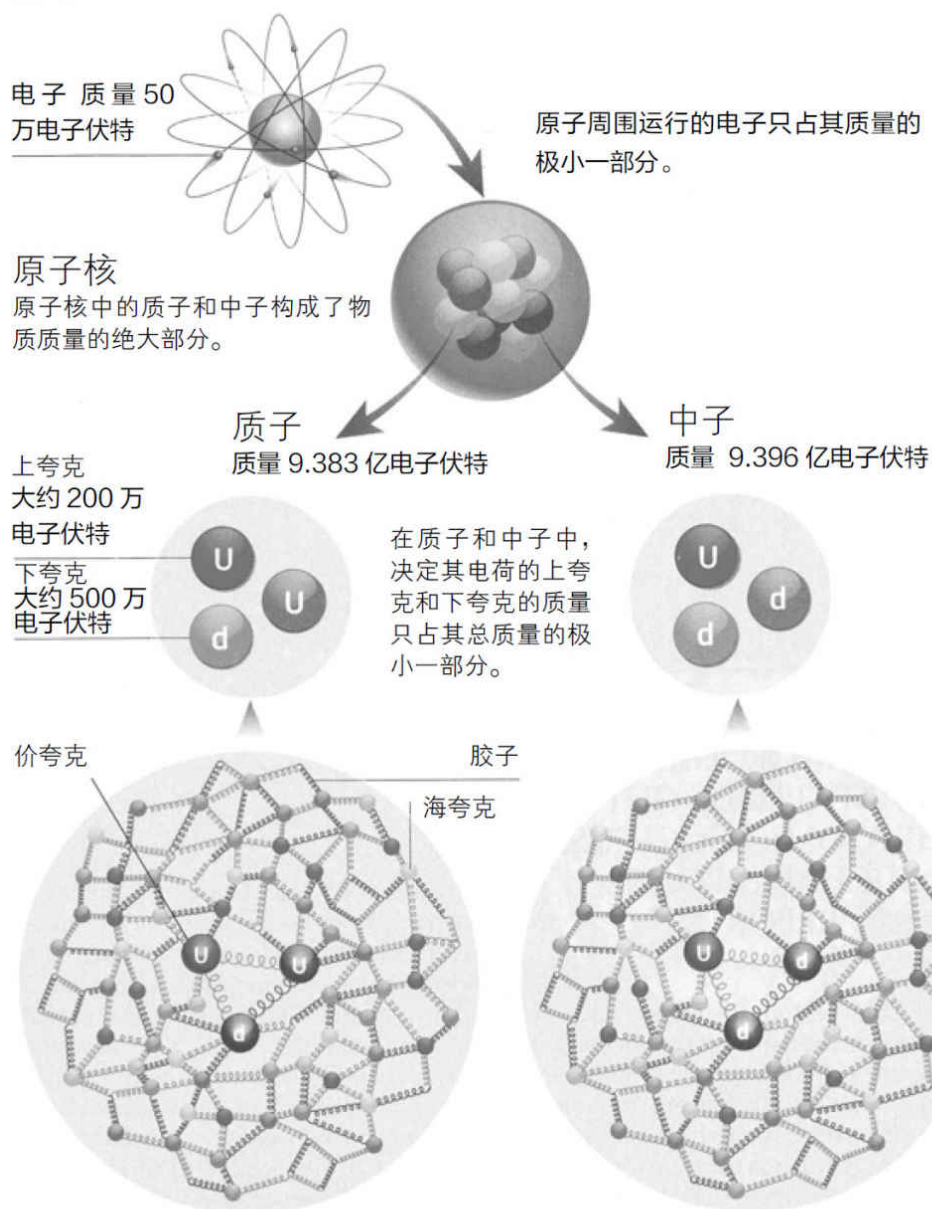
量子泡沫

为了理解这种量子泡沫，在过去的40年里，粒子理论物理学家们发明并改进了一种叫作晶格量子色动力学的技巧。差不多就相当于气象学家和气候学家把繁复庞杂的地球大气简化为一个由间距数千米的点构成的三维网格，以实现对其的模拟，晶格量子色动力学把核子内部简化为一个几十飞米（ 10^{-15} 米）的模拟时空里的点构成的晶格。夸克位于晶格的顶点，而胶子则沿着边缘传播。通过对所有这些边的相互作用进行汇总，并观察它们随时间逐步演化的方式，你就可以开始构建核子作为一个整体运作方式的图像。

哪怕是少量的晶格点（比如 $100 \times 100 \times 100$ ，中间间隔1/10飞米），也会产生海量的相互作用，因此晶格量子色动力学模拟需要强大的计算能力。令事情更加复杂的是，量子物理不会给出确定的结果，所以这些模拟必须运行数千次才能得到一个平均答案。

为了弄清质子和中子的质量从何而来，德国伍珀塔尔大学的佐尔坦·福多领导的研究小组利用了两台IBM“蓝色基因”超级计算机和两套集群计算处理器。在2008年，他们最终得到了两个核子的质量都是9.36亿电子伏特，误差为2500万电子伏特。这证实了夸克和胶子之间的相互作用构成了物质的大部分质量。也许你感觉自己很坚实，但实际上99%的你都是结合能（见图4.1）。

原子



质子或者中子的大部分质量蕴含在夸克和反夸克构成的“海洋”，以及约束着它们的胶子的相互作用能中。

图4.1 物质的质量从哪里来

这些计算的精确度仍然不足以确定质子和中子之间至关重要的质量差异。另外，这个计算忽略了电荷的影响。核子内所有的瞬态夸克和反夸克都是带电的，这给了它们一种自能量，对它们的质量有额外的贡献。

狡猾又黏人的胶球

胶球是完全由力构成的粒子。搞不好它们可以用来制造一把正儿八经的光剑。只有一个问题——它们似乎只存在于理论中。理论物理学家们坚持认为胶球一定存在，实验物理学家们却说我们可能永远无法证明它们的存在。

胶球是成团的胶子，胶子在夸克之间传递强核力，令它们结合成原子核内的质子和中子这样的事物。对一个充满胶子的世界的模拟表明，大约15亿电子伏特的能量，也就是一个质子所含能量的1.5倍，就应该足以将大量的胶子粘在一起形成一个胶球。1995年，牛津大学的弗兰克·克洛斯和他的同事、瑞士苏黎世大学的理论物理学家克劳德·阿姆斯勒指出，刚刚在欧洲核子研究中心发现的两个能量分别为13.7亿和15亿电子伏特的粒子可能符合这一标准。后来又有一个能量为17.1亿电子伏特的粒子加入了它们的行列。

但是强力是出了名的难以计算，而且为简单起见，人们在模拟胶球时倾向于假设一个只有大量胶子，没有什么其他东西的世界。在真实的宇宙中，当你测量一个胶球状态的时候，夸克也会开始像袜子上的毛刺一样粘在上面，这样就不可能证明它曾经是一个纯胶球。克洛斯说，那三个有希望的粒子最有可能的解释是被不同数量的夸克污染的胶子团——搞不好我们只能满足于这种模棱两可。

理论物理学家最恐怖的噩梦

要想了解质子-中子质量差的微妙根源，需要求解的不仅是量子色动力学方程，还有支配电磁相互作用的量子电动力学方程。试图同时解决这两个问题是理论物理学家们最恐怖的噩梦，但是在2014年，福多和他的同事们开发了一个数学上的变通方法，得出了质子-中子质量差的值。他们得出的数字与实测值相符（尽管仍有相当大的不确定性，约为20%）。

你可能想知道，从已知的第一原理数字出发，我们已经算出了什么。但是除了揭示复杂物质存在的原因之外，这还意味着我们现在可以计算出许多使宇宙运转的东西。以爆炸恒星内部的过程为例。超新星爆炸是第一次给宇宙播下比氢和氦还重的元素的事件。有了结合量子色动力学和量子电动力学的新能力，我们可能会回答诸如什么时候形成了哪些重元素这样的问题。

这一进展也可能有助于解决一些围绕基础物理学的问题。大型强子对撞机在2012年发现了希格斯玻色子，除此之外再无其他发现，留下了许多悬而未决的问题。为什么在大爆炸之后，物质战胜了反物质（[见第5章](#)）？为什么质子和电子区别那么大，电荷却呈彼此完美的镜像呢？总的来说，使用量子色动力学进行精确计算的能力可以揭示更多标准模型不能解释实验结果的地方，这可能会为我们指出新的基础物理学的方向。

同样值得记住的是，新技术往往源于对物质运作方式的更深刻理解。一个世纪以前，我们刚刚开始研究原子，计算机和激光等创新便基于这些知识诞生了；然后是对原子核的深入了解，从电站、炸弹到癌症治疗等或正或邪的技术随之而来。

深入研究质子和中子意味着我们现在可能会发现一个更深的矿层。胶子在与色荷的相互作用中要比光子在电磁相互作用中更加活跃，所以摆弄带色荷的粒子产生的能量可能远大于在原子尺度上做文章。麻省理工学院的弗兰克·威尔切克因发展出量子色动力学而获得2004年诺贝尔物理学奖。他曾经推测，强大的新X射线或 γ 射线源可能会从复杂的核物理学中产生。

与光子不同，胶子也可以与其他胶子相互作用，因此有可能会将彼此限制在一个不断翻滚的能量柱中。威尔切克就此开玩笑地提出，胶子说不定能让《星球大战》里的光剑成为现实。更有可能实现的前景是对能源更加有效地利用和储存。威尔切克说，原子核可以在一个小空间里储存巨大的能量，因此计算精确的核化学可能带来高密度的能量储存技术。尽管前路依然漫漫，但是随着量子色动力学计算准确性的提高，这条路终于打开了。欢迎来到夸克时代。

五夸克：一种寻找已久的新物质形式

人们观察到的夸克通常2到3个聚在一处，但是在20世纪60年代，人们预测夸克也可以4到5个成团。一颗四夸克在2013年被发现并得到证实，但是五夸克直到2015年才被发现。

在大型强子对撞机底夸克实验中，通过研究所谓的**b**重子的衰变，人们观察到了五夸克。这种衰变通常会波澜不惊地一步到位，但是强力的物理性质意味着，有时候在这个过程中会有中间状态。在这样一个不那么波澜不惊的衰变过程中，一个粒子突然出现，其特征与理论上的五夸克一致。从那以后，更多的数据证实了这一发现。

一些物理学家认为，这5个夸克被紧紧地束缚在一个定义明确的粒子中，而另一些人则认为，对它更恰当的描述是一个小分子，由一个两夸克介子和一个三夸克重子组成。由于这种粒子几乎立即衰变，所以它的大小和质量精确值还需要更多的实验来确定。

自旋危机

自1988年以来，质子的内部结构一直困扰着我们，当时欧洲核子研究中心的研究人员发现，他们无法解释质子的自旋。自旋是粒子的一种量子力学性质，类似于绕其自身轴的旋转。不同自旋的粒子对磁场的反应不同，所以测量起来相对容易。比如质子，有一个 $1/2$ 的自旋。这个自旋肯定以某种方式来自构成质子的组件的自旋，就像质子一个单位的正电荷来自三个内部价夸克电荷的加和：两个 $2/3$ 的正电荷和一个 $1/3$ 的负电荷。

通过用高能 μ 子将质子击碎，欧洲核子研究中心的欧洲 μ 子合作项目成功地测量了质子内部夸克的自旋。他们发现，这只能解释大约 $1/4$ 的预期旋转。随后的实验将这一比例略微提高至30%左右，但也证实了基本结果。

自那以后，这一“自旋危机”成了烦恼之源，因为它意味着我们不了解质子的量子结构。理想情况下，我们可以通过解量子色动力学方程来解除危机，然而质子是由那么多运动着的部件构成的，对于这样的粒子来说，计算将是非常困难的。使用超级计算机模拟质子自旋起源的尝试也在这样的复杂性面前败下阵来。

我们只能做一些杂乱的实验来填补空白。2014年和2015年，布鲁克海文国家实验室使用相对论重离子对撞机进行的实验表明，胶子本身可能携带了质子自旋的很大一部分，大约40%。

质子的一部分自旋可能与夸克和胶子各自的自旋方式关系不大，而更多地与它们如何围绕彼此公转有关。到目前为止，我们对如何测量这一点只有最模糊的想法。如果真有“万有理论”这样的东西，我们预计它看起来会很像量子色动力学，只是会更难计算。

如果平凡如质子，我们尚不能理解其内部的情况，那么掌握更伟大理论的希望便很渺茫了。

重粒子为什么不稳定？

粒子物理学的一个普遍规律是，重的事物容易衰变，释放出更轻的粒子，而且这些衰变产物通常携带很大的动能。中子衰变为质子（加上电子和中微子）。这是基本的物理原理：物体会向势能较低的状态转化，就像一个球从山上滚下来。我们知道，质量是能量的一种形式。一个较轻的质子衰变为较重的中子，就相当于一个球自发地向上滚动。对于给定类型的粒子，质量越大，寿命越短。所以顶夸克、W粒子、Z粒子以及希格斯粒子都是非常短命的。

但是为什么质子没有衰变为其他的轻粒子，比如电子和正电子呢？这是因为粒子物理学的基本对称性。对称性告诉我们哪些物理量是守恒的，是不可改变的（[参见第2章里的“为什么宇宙是对称的”](#)）。强力的对称性决定了重子数必须守恒：你不能凭空产生一个质子或者中子，也无法让其消失。就我们目前所知，质子是最轻的重子，所以不存在它可以衰变成的粒子组合，这使得它很稳定（[见第10章](#)）。

5 反物质

反物质的真实性也许就像科幻小说中的东西一样不同寻常。它们构成了一个完整的阴影粒子世界，然而奇怪的是，宇宙中至少在我们附近这一带，它们却是很罕见的。要做星际飞船的燃料，反物质大概永远不具备可操作性，但是它的爆发力说不定会打破标准模型，并揭示出为什么宇宙中充满了物质。

反物质简介

每个带电粒子都有一个与之质量相等但电荷相反的反粒子。质子有带负电荷的反质子，电子有带正电荷的反电子，或者正电子。1928年英国理论物理学家保罗·狄拉克提出的方程式最早揭示了存在反物质的可能性。4年之后，美国实验物理学家卡尔·安德森在宇宙射线中发现了正电子。

许多中性粒子也有反粒子。例如，中子是由带电的夸克组成的。把这些夸克换成与之电荷相反的反夸克，你就得到了一个反中子。中微子没有带电的组件，但是在传统的标准模型中，它们也有反粒子——自旋方向相反，轻子数相反。物质和反物质接触时，它们会相互毁灭，或者叫作湮灭。一个电子和一个正电子转变成两个光子，分别飞向完全相反的方向，每个光子的能量为51.1万电子伏特，与电子（或者正电子）的质量相对应。

反物质之父

出生于英国布里斯托尔的保罗·狄拉克（1902——1984）使我们对基本粒子和力的理解迈出了关键的一步。他在1928年列出的方程式预测了反物质——他因此获得了1933年诺贝尔物理学奖，当时年仅31岁。他古怪而笨拙，特别喜欢米老鼠。在许多人看来，他是自艾萨克·牛顿以来英国最伟大的理论物理学家。在伦敦威斯敏斯特大教堂的地板上有一块石头，上面刻着他著名的描述电子量子行为的方程式。



反物质在哪里？

若要列出标准模型的不完善之处，有一条肯定会在列表上名列前茅：它预测我们不存在。根据这个理论，大爆炸应该产生了等量的物质和反物质。在宇宙诞生后的一秒钟之内，它们就会彼此湮灭，宇宙应该充满了光，基本别无他物。然而我们却在这里。还有行星、恒星和星系。这一切，就我们所知，都是由物质构成的。

对于这个存在之谜，有两个可能的解释。第一个，物质和反物质的物理性质可能存在一些微妙的差异，这使得物质在早期宇宙中有了剩余。虽然标准模型预测，反物质世界是我们这个世界的完美镜像，实验却已经在镜子上发现了可疑的划痕。1998年，欧洲核子研究中心的实验表明，一种古怪的粒子——K介子转变成它的反粒子的概率略高于相反的转变，因而两者之间产生了微小的失衡。

随后，加利福尼亚和日本的加速器也开展了类似的实验。2001年，他们在K介子较重的表亲——B介子——中发现了一种更明显的不对称性。欧洲核子研究中心的大型强子对撞机底夸克实验现在正使用一台4500吨的探测器来探测数十亿的B介子并探求它们的秘密（见本章后文）。但它也未必能就反物质的去向给出一个定论。迄今为止，人们观察到的效应似乎还太小，不足以解释大规模的不对称。

物质之谜的第二个可能答案是，物质和反物质以某种方式逃脱了彼此致命的掌控。在某个地方，宇宙的某个镜像区域，反物质潜伏着，而且已经合并成了反恒星、反星系，或许还有反生命。

当一块热磁铁冷却时，单个原子可以迫使它们的邻居与磁场对齐，形成指向不同方向的磁域。大爆炸之后，宇宙冷却的过程中，也可能发生过类似的事情。随着时间的推移，这些微小的差异可能会扩展成庞大的独立区域。

这些反物质区域即便存在，也肯定不在附近。在恒星区和反恒星区的边界处发生的湮灭将会产生明确无误的高能 γ 射线特征。如果整个反星系与一个普通星系相撞，其湮灭的规模将是难以想象的。我们还没有见到过任何这样的迹象，不过宇宙还有好多部分是我们没有观察过的——更别提那些远得我们永远观察不到的区域。

反氦原子或者其他比氢重的反原子将成为这种反宇宙的证据。这将意味着反恒星正在通过核聚变制造反原子，就像普通恒星制造普通原子一样。在国际空间站，一项名为 α 磁谱仪的实验自2011年以来一直在宇宙射线中搜寻着这些反原子。到目前为止，我们仍然在等待着第一个来自反宇宙的使者。

我们能制造出反物质炸弹吗？

人类有朝一日可能会将反物质的毁灭力量用于破坏性目的，这种想法有着可怕的魔力。这是丹·布朗的小说《天使与魔鬼》（*Angels and Demons*，2000年）的核心思想。在这本书中，一颗含有1/4克反物质的炸弹差点毁灭梵蒂冈。

欧洲核子研究中心的物理学家罗尔夫·兰度亚认为，我们不必紧张。有一个很充分的理由可以解释为什么短期内不会发生这样的事情。“如果你把我们在欧洲核子研究中心30多年反物质物理学研究

中获得的所有反物质全都积攒在一起，哪怕你非常慷慨，你也能只得到一亿分之一克反物质。”他说，“就算在你指尖爆炸，它也不会比点燃一根火柴更危险。”接受正电子发射计算机断层扫描的病人血液中含有天然的放射性原子，它们会释放出数千万甚至更多的正电子，但不会产生不良影响。

即使物理学家能够制造出足够的反物质来生产可行的炸弹，其成本也将是天文数字。兰度亚估计，1克反物质可能要花费100亿美元。牛津大学的粒子物理学家弗兰克·克洛斯指出，以目前的技术，我们需要100亿年的时间才能收集到足够的反物质来制造丹·布朗的炸弹。

这并不是说我们不能以新的方式利用反物质。几十年来，物理学家已经能够制造出电子偶素——一种由电子和正电子构成的“原子”。2007年，加州大学河滨分校的物理学家戴维·卡西迪和艾伦·米尔斯制造出了第一个包含多个电子偶素原子的分子。电子偶素原子很快就会湮没成高能的光子射线，所以如果你把足够多的这种原子堆在一起，就有可能让它们同时湮没并发光——制造出一种强大的光子射线湮没激光，而在反应堆中引发核聚变将是这种激光的潜在应用之一。

大爆炸的小变故：揭开物质存在的奥秘

你家厨房灶台上的香蕉是宇宙中最大奥秘之一的化身，只是有待被剥开。它是由物质粒子组成的，就像你一样，这就是为什么你可以看到、感觉到并品尝它。你看不到的是，每秒大概有15次，它会产生另一种粒子，一种几乎在瞬间就会消失在闪光里的东西。这个东西便是反物质。

反物质构成了一个完整的粒子镜像世界，这些粒子的质量与正常物质的粒子相同，电荷相反。不过这好像是后知之明。在我们这一带，反物质粒子只会产生于高能宇宙射线在大气层中的相互作用中，或者放射性衰变中，比如香蕉里的放射性钾-40的衰变。

从某种意义上说，这并不奇怪，因为反物质和物质一旦相遇就会湮灭，释放出高能光子。但这就留下了一个谜团，那就是物质为什么会如此占优势？

因此，也许是宇宙鸿蒙初开时的某个小小变故导致某些物质存活下来，并制造了所有的东西，从香蕉到黑洞，从海马到恒星。物质和反物质之间十亿分之一的差异就足够了，因为在大爆炸的超热“汤”中，粒子和反粒子会不断被创造和湮灭，让失衡不断加剧。

解释物质的主导地位

20世纪60年代，詹姆斯·克罗宁和瓦尔·费奇发现，反K介子的衰变速率与对应的K介子不同。这种现象被称为电荷共轭宇称（CP）破

缺。这意味着，如果你观察一个粒子反应，然后在镜子里观察由反粒子进行的同一反应，你会看到两个反应的速率略有不同。这类现象也许可以解释为什么物质占优势地位。但不幸的是，迄今为止，我们测量到的效应还太小，不足以解释宇宙中反物质的缺乏。

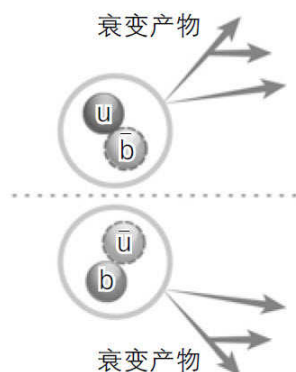
欧洲核子研究中心的大型强子对撞机底夸克探测器登场了。根据个人品位，这部探测器英文名称缩写（LHCb）中的“b”可以理解为“美”（beauty）或者“底”（bottom）。底夸克比上夸克和下夸克重得多，而且非常不稳定，但是大型强子对撞机的质子对撞有足够的能量产生它们。它们与其他夸克结合形成B介子，而B介子可能是物质获胜的关键。

包括加利福尼亚SLAC国家加速器实验室（SLAC代表Stanford Linear Accelerator Center，斯坦福直线加速器中心）的BaBar和日本高能加速器研究机构实验室的Belle在内的实验表明，当含有底夸克的粒子衰变时，就会发生CP破缺，而且产生的失衡比K介子的更大（见图5.1）。

六种夸克和反夸克总是结合成更大的粒子。



大多数情况下，反粒子的衰变方式就像是对应粒子的镜像。



含有底夸克和反底夸克的粒子有时候以不对称的方式衰变。大型强子对撞机底夸克实验的质子对撞创造出大量这样的粒子，使人们得以观察这种“CP 破缺”。

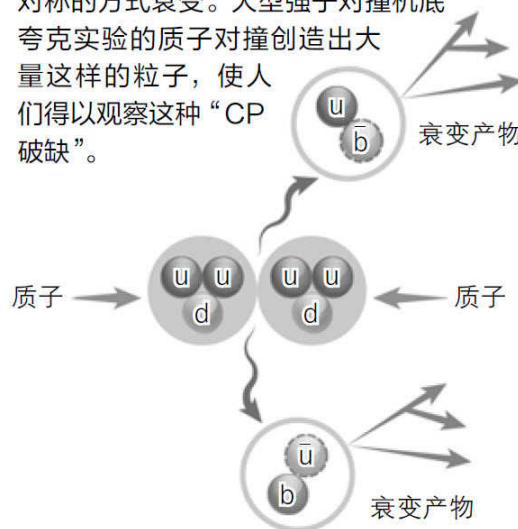


图5.1 含有重夸克及反夸克的粒子衰变方式中微妙的不对称可能蕴含着物质之所以在宇宙中取得优势地位的线索

即便如此，到目前为止，相对于解释物质普遍存在所需要的CP破缺，已知粒子的衰变只占了一万亿分之一。与此同时，希格斯玻色子的发现只会让这个谜题更加难解。它1250亿电子伏特的质量和观测到的衰变率符合粒子物理标准模型的预测。如果它违反了那些预测，那倒是有可能暗示了某种未知粒子的影响，而这种粒子有可能成为另一个CP破缺的来源。

这令焦点又回到了B介子身上。“美工厂”BaBar和Belle令电子和它们的反粒子——正电子——碰撞，其能量在数十亿电子伏特的范围内，只能以可观的数量制造出最轻的B介子。除了轻B介子和B重子外，大型强子对撞机还产生了比这些实验更重的B介子。通过研究最广泛的美粒子衰变途径——它们应该具有不同的CP破缺，我们有可能得出从总体上描述CP破缺的最佳理论。

热汤

针对为什么物质会占据主导地位的问题，要想找到任何有意义的答案，我们需要重建能量水平更高的原始汤状态。2015年，对撞机开始以创纪录的14万亿电子伏特能量粉碎粒子。这种更高的能量意味着会有更多的B粒子产生，使人们能够开展更加敏锐的CP破缺研究。

大型强子对撞机底夸克实验的探测器呈锥形或者楔形，碰撞发生在尖端。这大幅降低了它探测希格斯玻色子的灵敏度，因为希格斯玻色子往往以较大的角度出现在它的探测区域之外。然而B介子的探测却正要采用这样的方式，因为它们往往沿着原质子束的方向携带着其动量出现（见图5.1）。大型强子对撞机产生的高能B介子经过底夸克实验探测器时可以留下长达1厘米左右的轨迹（比早期实验中低能介子的轨迹要长），从而可以实施更详细的测量。

2017年1月，大型强子对撞机底夸克实验的科学家报告了重子（质子和中子都属于重子）衰变过程中CP破缺的第一个证据。当时的研究对象是底 Λ 粒子，它包含一个底夸克。虽然标准模型预测了底 Λ 粒子一定程度的CP破缺，但是如果能够分析大型强子对撞机得出的更多数据，人们将可以揭示这种衰变中的CP破缺是否与预期有出入。如果它

不符合标准模型，那就意味着我们将有新的物理学发现，而且这种发现将涉及为什么物质比反物质多这一基本问题。

大型强子对撞机升级之前的数据显示，在B介子衰变为一个K介子和两个 μ 子这一罕见的过程中，标准模型的预测出现了偏差。从那时起，随着底夸克实验得到的结果变得更加精确，它们与理论模型的差异也越来越大。然而，理论预测本身也面临着挑战，粒子物理学界并不认为它是完全可靠的。

此外，在两种衰变之间也有不平衡的迹象——一种是B介子衰变为一个K介子、一个电子和一个正电子，另一种是B介子衰变为一个K介子和两个 μ 子。然而，证据仍旧不足以说明，是某些未知的物理原理导致了这种异常，还是它能有助于解释物质之谜。

另一个焦点是由反底夸克和奇夸克组成的奇B介子的衰变。它可以自发地转变成它的反粒子（底夸克加上反奇夸克），观察反向过程是否以同样的方式发生，成了研究CP破缺的另一途径。另外，每10亿次中有3次它会衰变为一个 μ 子和一个反 μ 子。这种衰变可能很少见，但它的最终状态很容易被观察到，因为 μ 子会在探测器上留下一条直达最外层的轨迹。来自英国利物浦大学、参与大型强子对撞机底夸克实验的塔拉·席尔兹认为，这使得它成为一个寻找新物理学的“黄金通道”。

在这里，人们感兴趣的可能不仅仅是CP破缺，还有超对称性等理论预测的现象的蛛丝马迹。这些理论假设存在着新的大质量粒子。罕见的B介子衰变应该格外容易受到未知大质量粒子的影响，这也许给了大型强子对撞机底夸克实验一种不直接探测到便证明其存在的巧妙

手段。任何与B介子的预期衰变率有差距的实验结果都有可能意味着隐藏的粒子参与其中。

奇B介子衰变太罕见了，时至今日，只有很少的实例在实验中被观察到，而且到目前为止，它的行为并没有给标准模型带来彻底的变革，大型强子对撞机产生的其他B介子也没有。不过，利用改进过的粒子加速器对美粒子开展更多的观察，可能会带来改变。

企鹅的线索

在寻找物质和反物质之间差异的过程中，一种反常现象可能最终会令我们有所收获。较重的B介子衰变为 τ 粒子的频率比标准模型预测的要高。这种衰变被称为企鹅过程，这是因为当物理学家用费曼图描绘其过程时，他们最终得到的东西看起来像只企鹅。

不平衡的企鹅现在已经在三个不同的实验中出现过，包括大型强子对撞机底夸克实验。在该实验的数据中，B介子衰变产生的 μ 子的能量和轨迹也一直是异常的。这些异常现象可能预示着物理学即将有新的发展。或许B介子在进一步衰变为 μ 子之前，会先衰变为尚未被探测到的粒子，从而扰乱了它们的最终分布？理论物理学家们推测，罪魁祸首可能是轻夸克——一种轻子和夸克型粒子的混合体——或者是一种新的希格斯玻色子。

尽管这些观察到的不平衡很小，但它们可能会引出后续的一条研究路径。在更高的能量下，类似的企鹅过程可能会导致更大的不平衡。

反引力：反物质会跌向上方吗？

如果你拿起一块反物质再放开它，让它自由地穿过“充满敌意”的物质世界，它有没有可能会神奇地浮起来呢？很少有物理学家敢给出断言。如果不做实验，我们根本无从知晓。

对反引力的质疑可以追溯到20世纪50年代，当时物理学家赫尔曼·邦迪正在思考广义相对论的含义。爱因斯坦提出的这个理论解释了引力如何在宇宙结构被扭曲时产生。引力是一种奇怪的力，尤其是考虑到它只有一个作用方向。比如说，在电磁学中，有正负两种电荷，相互之间或吸引或排斥。然而到了引力这里，只有总是相互吸引的正质量。

邦迪向世人展示了，若非如此，世界将会是多么奇怪。他证明了负质量最终会以越来越快的速度穿越宇宙，追求正质量。德国法兰克福高等研究所的萨比娜·霍森菲尔德说，这种夸张的运动似乎并不存在，不过我们下结论时应该谨慎。说不定我们需要修正广义相对论，而不是抛弃负质量。

质量有两种类型：引力质量决定一个物体会受到多么强的引力，而惯性质量决定了一个物体对加速度有多大的抵抗。许多实验表明，这两个质量总是具有相同的值——这是一个神秘的等价。爱因斯坦对引力的描述，也就是广义相对论，便是围绕着它展开的。然而所有这些实验都只涉及正常物质。反物质是否能够形成一个具有正常惯性质量但是引力质量为负值的物体，从而打破等效原理呢？

宇宙的另一个角落

在世界各地的一些实验室里，对负质量的追寻仍在继续。反物质是一个很有希望的追寻方向。它和普通物质差不多，只不过电荷和其他一些量子性质相反。这并不意味着它也应该具有相反的质量，但是如果它确实具有，倒有可能有助于解释另一个谜：反物质都去了哪里。排斥性的引力相互作用可能会把物质和反物质从彼此身边驱离，因此在早期的宇宙中，它们永远不会有湮灭的机会。从那时起，宇宙的持续膨胀将会把这两者推得更远——反物质说不定已经在宇宙的其他角落创造出了自己的星系。

让物质从地球表面悬浮起来，其中蕴含的技术可能性引得美国空军也插了一脚。多年来，他们已经为反物质研究人员提供了数以百万计的资金。不幸的是，开展这方面的实验是一项相当艰巨的任务。首先，你需要为反物质搭建一个几乎完全不含正常物质的家。这就要制造出地球上最空的盒子，每升容积只含有几百个气体分子。然后，为了防止反物质撞击盒子的侧面并立即湮灭，你必须把它冷却到绝对零度以上几开氏度以内，然后用电磁场捕捉它。

在欧洲核子研究中心巨大的反物质减速大厅里，有六项实验正在争先恐后地测量反物质基本性质。下面，来自欧洲核子研究中心质子同步加速器的粒子束撞击到一块金属上，产生了大量的粒子。一个磁体系统挑出其中的反质子，将它们送入一个由更多磁体组成的环中。在反质子被减速以便捕获的过程中，这些磁体将使它们保持在轨道上。

接近一致

自20世纪90年代以来，这里一直有实验在研究反物质和物质粒子是否真的像我们认为的那样接近。2015年，通过测量反质子在被称为彭宁阱的磁性封闭体中如何旋转，重子反重子对称实验对它们的惯性质量与电荷之比给出了迄今为止最精确的测量。结果表明，这个比值与质子的一致，误差在万亿分之六十九以内，比之前的最佳值精确4倍。

2016年11月，邻近的低速反质子原子光谱和碰撞实验对反质子的惯性质量进行了迄今为止最精确的测量，没有找到与质子的质量有什么差异。

但是在引力效应这方面，质量是正的还是负的呢？这个问题将实验带到一个新的细节层面。引力太弱了，很容易被电磁力掩盖，所以用磁场控制反质子这样的带电粒子来做实验的想法就不可行了。你可以尝试让反质子就位，然后关掉磁体，看看它朝哪个方向下落，然而反质子与周围环境的静电相互作用会盖过它可能感受到的任何引力，别管方向如何。

更好的选择是反物质的中性原子，比如反氢原子（参见后文的“反元素”）。它们之间的静电相互作用还不足以抵消引力，但是很强的磁场仍然能够将它们保持在一定的位置。欧洲核子研究中心的反氢原子激光物理仪器实验会定期捕获并保存成束的反氢原子约15分钟。

2013年，该实验团队发表了一份原理测量的证明。这次测量中，研究人员短暂地收集了434个反原子构成的云，关闭磁体并根据它们湮灭的位置跟踪它们的后续运动。这是一个粗略的测试，没有得出结论——无论反粒子的引力质量是正还是负，都符合最终结果。必要的准确性并不容易达到，因为实验使用的反原子比较热，所以会震动，这

就给问题蒙上了一层阴影。不过反原子足够多的话，还是应该会有助于我们回答核心问题。

欧洲核子研究中心的另一项实验——反物质引力、干涉成像、光谱学实验也计划在几年内进行测试。芝加哥伊利诺斯理工学院的丹尼尔·卡普兰正计划用电子较重的亲戚—— μ 子进行实验，而由伦敦大学学院的戴维·卡西迪领导的研究小组正计划使用电子偶素。

回到欧洲核子研究中心，一项名为“静止状态反物质引力行为”的实验旨在用一个反氢离子（一个反质子和两个正电子的组合）来解决这个问题。理论上，用磁场把这个带电微粒固定在适当的位置并用激光冷却它应该是很容易的。接下来的想法是用另一束激光打掉一个正电子，使反原子恢复电中性。这个时候，它将不再感觉诱捕场的影响，开始跌落——向上或者向下。实验负责人帕特里斯·佩雷斯表示，他们希望测量的灵敏度足以探测到正常物质所感受到的哪怕只有1%的引力偏差。

实验人员并不指望反物质会向上跌落，但是只要它跌落的方式稍有异样，就会非常有趣。那可能表明存在着某种能够改变引力的力量，其作用放过了正常物质，却没有放过反物质。如果引力子——一种假想中的量子粒子，负责携带引力——有一个微小的质量，而不是通常认为的无质量，便有可能产生类似的引力修正效应。

反元素

欧洲核子研究中心的两项实验，反氢陷阱和反氢原子激光物理仪器实验，已经在制造反氢原子——可能存在的最简单的反原子，

仅仅由一个反质子和一个正电子结合在一起。他们的目标是产生足够多的反氢原子，并将其保存足够长的时间，以便将其发出的光谱与普通氢的光谱进行比较。哪怕两者之间仅仅存在细微差别，标准模型也会遭到动摇，因为标准模型预测两者应该完全相同。

2016年，经过制造并持有14个反氢原子，杰弗里·汉斯特及其同事在反氢原子激光物理仪器实验合作项目中首次观测到反物质谱线。他们发现，反氢原子光谱中能量最低的光子确实具有与氢原子相同的波长。

我们能否指望物理学家们制造出更复杂的反物质——反氦，乃至由反碳原子和整个反元素周期表构成的有机反物质呢？问题在于，在构建反原子的过程中，组成它的亚原子反粒子只能一个一个地制造。如果你想制造反氦——和反氢差不多，但是多一个反中子——你首先要制造反中子。反中子是中性的，因此不可能采用传统的方式，利用电磁场来控制其方位，于是你只能制造大量的反中子，并希望每制造100万个左右的反中子，就能有一个出现在正确的地方，刚好拼凑出一个反氦原子。

虽然还没有人解决这个问题，但是欧洲核子研究中心的一项实验使用了一种简洁的方法来制造反氢原子以外的东西。低速反质子原子光谱和碰撞实验创造了反质子氦原子，其中一个绕氦核运行的电子被反质子取代（见图5.2）。通过研究这种物质/反物质复合原子发出的光谱，反质子的电学和磁性能会被精确地测量出来，并与普通质子的电学和磁性能进行比较。

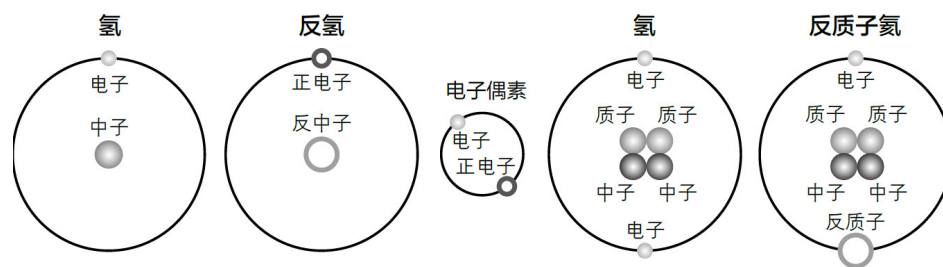


图5.2 反工程的物理学家们已经制造出了镜像的氢、被称为电子偶素的电子——正电子对和含一枚反物质的氦原子

6 与世无争的小家伙

中微子是最难以捉摸的物质。这些幽灵般的粒子可以径直穿透地球而几乎不受阻碍。中微子是标准模型的一部分，然而它们的变味能力却暗示了，有些事情已经远非标准模型所能概括。

中微子到底是什么？

中微子呈电中性，质量接近于0，是最隐蔽的粒子。它们与普通物质几乎不发生作用，正以每秒数万亿颗的频率穿过我们的身体、建筑物和地球。1930年，奥地利出生的物理学家沃尔夫冈·泡利首次预言了中微子的存在。他在1945年因这项研究获得了诺贝尔奖。好几种核反应都会产生中微子，包括作为太阳能量来源的聚变、被人类用来制造武器或者获取能量的裂变，以及地球内部的天然放射性衰变。

我们怎么知道它们的存在呢？狡猾的中微子通常避免与物质接触，不过偶尔也会撞上原子，产生一种令我们能够观察到它们的信号。弗雷德里克·瑞恩斯在1956年第一次发现了它们，为自己赢得了1958年的诺贝尔奖。实验中最常见的做法是使用大量的水或者油。当中微子与这些液体分子的电子或者原子核相互作用时，它们会发出传感器可以探测到的闪光。

在那些深藏地下以躲避外来粒子干扰的探测器身上，人们投入了大量的资金和极端的工程技术。例如，乳胶追踪设备震荡项目被建造在了意大利的格兰萨索山脉内部。这个方案行得通是因为中微子能够径直穿过岩石。还有一些项目把探测器指向下方，以整个地球为屏障。其中，中微子望远镜和深渊环境研究项目的探测器被埋在地中海下面，另一个名为“冰立方”的则被埋在南极冰层下面。

中微子鬼鬼祟祟的性情掩盖了它们潜在的重要性。就拿额外的维度来说吧，大多数粒子有两个变体：顺时针自旋的和逆时针自旋的。

中微子是唯一似乎只能逆时针自旋的粒子。一些理论物理学家认为这证明了额外维度的存在，而“缺失的”右旋中微子就藏在额外维度中。

就像带电的轻子一样，中微子也有三种味：电中微子、 μ 中微子和 τ 中微子。但是，与带电的轻子和我们所知的其他粒子不同的是，它们可以从一种味转变成另一种味。

中微子：下一个重大的小东西？

“为王者，心神难安。”莎士比亚如是写道。如今，这句话也适用于粒子物理学的标准模型——我们对物质的构件及其相互作用最成功的描述。希格斯玻色子的发现是该理论的最高成就，它证实了近40年前的预测，填补了该模型最后一个重大空白。然而，我们一如既往地渴望把它赶下宝座，去发现必然会取代它的新物理学。

中微子现在能引导我们达到这个目标吗？标准模型威力强大，但还是留下了许多未解之谜——比如暗物质的性质——我们认为这种看不见的神秘物质构成了宇宙总质量的80%以上。还有被认为导致了宇宙加速膨胀的暗能量。量子物理学把暗能量的量级高估了 10^{120} 倍，这肯定是我们有史以来最糟糕的预测。标准模型无法解释物质如何在大爆炸中逃过了与反物质湮灭的命运，也无法将引力纳入其中。它充满了自由参数——那些令人头疼的数字都是人们主观决定的，只能手工输入理论中，例如为每一个力设定的强度。

研究人员曾希望希格斯玻色子能带来新物理学，从而让这些问题得到解答。然而截至目前，希格斯粒子的表现基本上与预期一致，因此，真正通往超越标准模型王国的关键可能在于中微子——一种不同的粒子。影影绰绰、神神秘秘、不走寻常路的中微子很少屈尊与它们周围的普通物质世界相互作用，因此我们对它们的许多了解都在标准模型之外。

微小的质量

我们所知道的三个中微子与电子及其两个较重的同类—— μ 子和 τ 子一一配对。此外，还存在三种反中微子，它们与电子、 μ 子和 τ 子带正电的反粒子一起构成了扩展的轻子家族（[见图2.2](#)）。从一开始，标准模型就错误地假设中微子没有质量。但是我们现在知道，它们确实具有质量——尽管很小——这就是为什么它们具有从一种类型转变成另一种类型的神秘能力。许多新理论希望填补这一理解上的空白，包括旨在统一所有自然力（除了引力）的大一统理论，以及超对称性和弦理论。

中微子有着冷漠的本性，但是作为解决问题的粒子却有着悠久的历史。1930年，为了维持放射性 β 衰变中能量和动量的守恒，物理学家沃尔夫冈·泡利构想出了它们。从那时起，它们就完美地融入了标准模型井然有序的粒子图像。

但是到了1998年，日本超级神冈实验的结果中，标准模型对中微子的描述出现了漏洞。中微子带着电子、 μ 子或者 τ 子的味被发射或者吸收，就像一勺冰淇淋。超级神冈研究了宇宙射线撞击大气层时产生的 μ 中微子，发现其中一些在穿越地球的过程中变成了电中微子。

之前人们就发现过这种在不同味之间转换的迹象，但这个实验提供了明显的证据。从那时起，研究核反应堆、粒子加速器和太阳内部核衰变过程产生的中微子的实验证实，不管一开始怎样，中微子会在它们的旅途中在三种味之间切换。要让这样的切换得以发生，中微子必须具备一定的质量。

味的传播

这是一个非常量子的现象。在量子力学中，一个粒子可以处于多种状态的叠加状态——而对于中微子来说，一种明确的味态是三种不同明确质量态的混合。这三种质量态都以略低于光速的速度运动，彼此稍有差异，正是它们的精确排列决定了中微子被观测到的味。因此，这三种中微子的味以一种不断变化的混合态在空间中传播。

一些大一统理论预测中微子具备质量。如果确定了准确的质量，理论物理学家就能知道该推进哪个理论了。

要想测量一枚可以穿行厚达一光年的铅块而不会受到任何阻碍的粒子的质量，可谓说起来容易做起来难，不过测量放射性 β 衰变是一种方法。在典型的 β 衰变中，原子核内的中子变成质子，同时释放出一个电子和一个反电子中微子。理论上，反电子中微子的质量可以通过与之相伴的电子的能量和动量推断出来。中微子太轻了，之前人们一直无法满足测量所需的灵敏度，不过在德国卡尔斯鲁厄理工学院，人们正在开展的卡尔斯鲁厄氚中微子实验或许具备了足够的灵敏度。

与此同时，对中微子质量最严格的限制来自宇宙，因为这些粒子影响着大爆炸和超新星爆发产生的元素类型及含量、宇宙的膨胀率、宇宙微波背景，以及物质合并成星系和星系团的方式。结合最新的宇宙学测量，包括来自普朗克空间天文台对宇宙微波背景的观测，人们发现三个中微子质量之和不可能超过0.13电子伏特——不到电子的百万分之一。

由于中微子的味不断变化，很难把这个总和分解成三种中微子的质量。研究人员正在逐步改进他们对中微子质量和决定了中微子味的混合质量状态的测量。

任何解释中微子质量的理论都必须解释为什么它的质量跟其他粒子比起来小得几乎可以忽略不计。一种理论认为，这三种已知的中微子可能被一个或者多个只能感受到引力的“惰性”中微子遮蔽。通过一种名为跷跷板机制的过程，这些看不见的重中微子压制了人们检测到的中微子的质量。

这一切都使得这些轻若鸿毛、“不善交际”的变味粒子更加神秘。它们对我们有所隐瞒，但是到底隐瞒了什么，以及我们将从中得到超越标准模型的物理学的什么信息，仍然有待我们去发现。

神奇超光速中微子的消失

2011年9月，探测 τ 中微子的乳胶追踪设备震荡合作项目震惊了世界。它宣布，中微子从瑞士的欧洲核子研究中心到意大利格兰萨索山脉地下探测器的速度超过了光速。这一壮举违背了爱因斯坦的相对论，打开了通往物理学未知境界的大门。

但是在接下来的几个月里，人们排查出两个错误——一个是没插结实的光纤，一个是出了故障的时钟，排查的结果是中微子的速度慢了下来。我们现在知道中微子接近光速传播。时任欧洲核子研究中心研究主任的塞尔吉奥·贝托鲁奇说：“虽然这一结果不像一些人希望的那样令人兴奋，但它是我们所有人都在内心深处期待的结果。”

变反物质为物质

对最罕见事件的追寻可以揭示为什么物质主宰宇宙——如果我们能发现每100亿亿亿年才发生一次的事情的话。你可以一直等待、观察，说不定直到天荒地老也看不到它的发生。然而，成千上万的物理学家正在投身于追寻这个极其罕见过程。这是放射性衰变的一种形式，一旦被发现，就能揭示宇宙中还能有物质存在的原因。

放射性衰变是大自然的炼金术。它能够某些较重的元素转化为较轻的元素，但它有自己的运行时间表——有些元素的寿命只有几分钟，有些则长达数千年。这些放射性过程对我们的生存至关重要，例如 β 衰变参与了为太阳提供能量。最常见的 β 衰变类型是，原子核中的中子转化为质子，在这个过程中抛出电子和反中微子（中微子的反物质伙伴）。

1935年，物理学家预测某些原子核可能同时经历两次这样的衰变。在一个给定原子核中，这种已知最罕见的核衰变形式可能要每 10^{19} 年到 10^{24} 年才会发生一次。然而，持续观察一个足够大的原子群体，你就能增加自己见证一次这种衰变的机会。事实上，我们现在已经在11个不同的重原子核中观察到了它。

即便这些衰变很罕见，也赶不上研究人员目前正在寻找的。在无中微子双 β 衰变中，两个中子转化为两个质子和两个电子——根本不产生反中微子（见图6.1）。

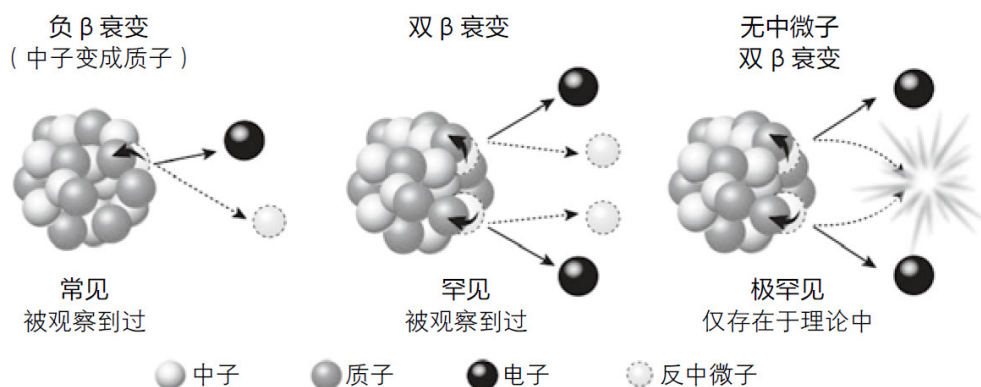


图6.1 人们认为所有的放射性 β 衰变都应该产生某种类型的中微子。不过，如果中微子的反粒子就是它自己，那么每100亿亿亿次衰变中，会有一次根本不产生中微子

要想实现这种消失的戏法，需要某种非凡的事情发生。这两个反中微子需要事实上相互抵消，就像粒子和它们的反粒子在接触时相互湮灭一样。然而，如果要使这两个相同的粒子彼此湮灭，中微子和它们的反粒子必须是同一粒子——它们必须同时是物质和反物质。

野外发现

尽管早在1956年人们就在自然界发现了中微子，但是它们仍有很多方面不为我们所了解。部分问题在于，它们对宇宙中其他一切事物的关注极少——每秒钟有数十亿颗来自太阳的中微子穿过你的身体，它们还能够穿入厚达1光年的铅块，毫发无损地出现在另一边。即使是中微子是否有质量这种看起来很简单的问题，也是到了21世纪初才得到解决。这个结果被认为意义重大，因此研究者赢得了2015年的诺贝尔物理学奖。然而我们仍然不知道为什么它们的质量这么小。

1937年，意大利物理学家埃托雷·马约拉纳预测，带质量的中微子将具有一个有趣的性质。作为物质中唯一不带电荷的基本粒子，从理论上讲，它们有可能成为自己的反粒子。对于这种“马约拉纳中微

子”来说，物质和反物质之间的区别已经过时了。凭借它们参与的反应中的些许CP破缺，这种额外的自由让更多的物质逃脱了大爆炸中的湮灭。

发现无中微子双 β 衰变可以解释我们从何而来，并给出物理学理论应该走向何方的线索。但是，在50多年的探索中，只有一次假定的无中微子双 β 衰变实例被观察到。那次结果是在2001年由意大利格兰萨索实验室报告的，它被通俗地称为克拉普多-克莱因罗斯衰变，以海德堡大学研究员汉斯·克拉普多-克莱因罗斯的名字命名。他维护其准确性超过10年。大多数物理学家仍然没有信服，不过这个结果吸引了所有对衰变感兴趣的人。

为了确认或者排除克拉普多-克莱因罗斯事件的可能性，人们开展了大量研究活动，并在格兰萨索、新墨西哥州和日本安排了实验。自2015年以来，他们似乎已经完全证伪了那个事件，因为如果它是真实的话，他们应该看到更多。

我们能用中微子束交流吗？

我们可以而且已经做到了。第一条由中微子承载的信息是在2012年传送的。当时，伊利诺伊州巴达维亚费米实验室的一个团队利用主注入器中微子束向1000米外的MINERvA探测器发射了包含数万亿枚中微子的脉冲。研究小组用标准的二进制通信码编码了“中微子”这个词。因为中微子很难被探测到，发送端反复传送了142分钟才让另一端接收到了清晰的信息。

中微子很少与其他形式的物质相互作用，所以它们能畅通无阻地穿过大多数物体——甚至包括地心。这给了它们成为信使的潜在用途，也许可以用来与隐藏的潜艇交流。即便是带宽非常低的系统也可能用于交换加密密钥。

漫长的等待

这些更大的实验也令我们掌握了更加精确的衰变寿命测量结果，将等待单个原子核通过无中微子双 β 衰变解体的最短时间延长到 10^{25} 年。

现在，至少有8个新的或者改进的实验正在寻找这个过程，这些探测器也许拥有足够的规模和灵敏度来实现这个目标（见图6.2）。它们的运作方式大致相同：在地下深处聚集大量极其纯净的同位素，在那里它可以免受宇宙粒子的轰击，而这种轰击可能会使探测结果陷于大量“杂音”之中。然后，耐心等待。依靠大数定律，衰变终究会发生。

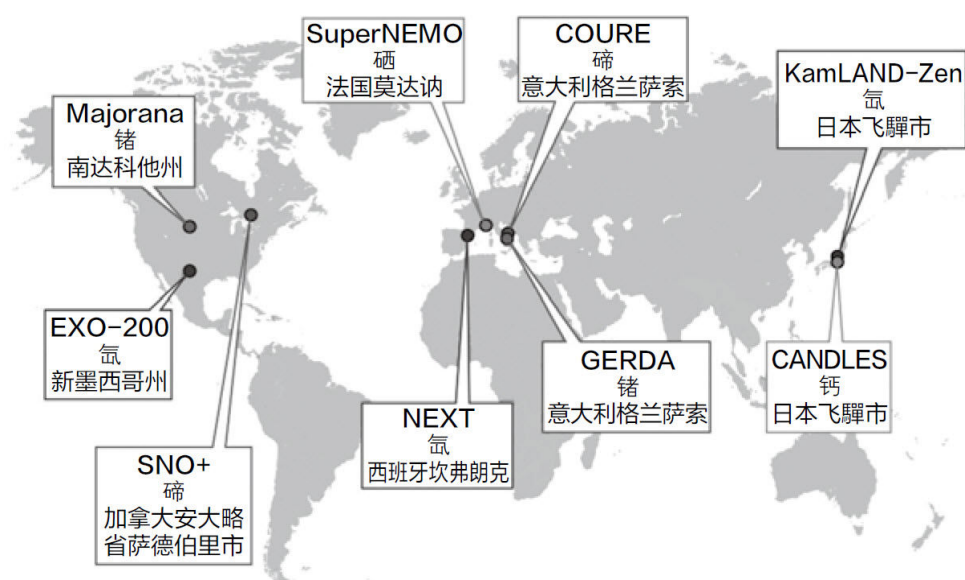


图6.2 探测无中微子双 β 衰变需要将大量合适的放射性物质深埋地下，等待这种衰变的发生。全世界有很多实验正在进行中，使用的同位素不尽相同

目前，只有少数的同位素灵敏及丰富程度可用于这种规模的实验。每一种都有其优点，但是现在所有的目光都集中在锗上。这种金属紧密的晶体结构令研究人员得以使用一种更紧凑的仪器来非常精确地测量两个发射电子的能量，从而更容易从背景事件中分辨出真正的衰变。锗探测器阵列实验使用了40千克的锗。该实验是格兰萨索实验室的项目，也促成了克拉普多-克莱因罗斯衰变的出局。它的主要竞争对手，位于南达科他州铅镇地下深处一个旧金矿里的马约拉纳演示器，一直在用一个44千克的设备记录数据。

然而，根据我们对衰变寿命最乐观的估计，我们至少需要1吨的探测材料才能确保得到信号。这已经接近单个实验所能提供的极限，意味着研究人员需要合并资源。马约拉纳和锗探测器阵列的研究人员已经讨论过合作建立第一个使用1吨以上优化同位素的实验。这需要至少10吨可以提纯的锗原料——占全球年供应量的近10%。如果没有用于此类研究，这些原料将流向科技公司，用于制造速度更快的电脑芯片。

未被发现的粒子？

即便物理学家观察到这样的衰变，这也不足以证明马约拉纳中微子就是背后的原因。也有可能在这种更复杂的机制中，某种尚未被发现的粒子扮演了中微子的角色，导致了这种罕见的衰变。区分这些机制并非易事，不过物理学家们的装备库很快又会有新的实验扩充进来——包括德国的卡尔斯鲁厄中微子实验，其目标是一劳永逸地确定

三种基本中微子的质量，还有美国的地下深层中微子实验，其目标是确定质量与味的对应关系。如果无中微子双 β 衰变确实是由马约拉纳中微子引起的，物理学家可以利用这些实验得出的数据计算这一过程的寿命。然后，他们可以查看结果是否与直接探测的结果匹配。

如果不匹配，那就意味着有其他原因导致无中微子双 β 衰变。欧洲核子研究中心的大型强子对撞机目前正在直接探寻的一系列理论，包括超对称性的某些变体，都预测出了这种机制。然而，往往最简单的解决方案才是最好的，物理学中尤其如此——马约拉纳中微子的另一项优势是，它们可以解决为什么中微子如此轻这一棘手问题。

大多数基本粒子的质量都是通过希格斯场得到的。希格斯场是一个遍布宇宙的场，2012年希格斯玻色子的发现证明了它的存在。但是，这些质量极小的中微子几乎不与希格斯场相互作用。这使得一些物理学家相信，一定还有其他产生质量的机制在起作用。

又轻又懒的中微子

其中最受欢迎的是跷跷板机制。在这种机制中，质量远超任何其他基本粒子的较重惰性中微子降低了它们较轻的同类粒子的质量。

惰性中微子在宇宙的最初时刻就会衰变，只留下较轻的变种。这在数学上是一个优雅的解决方案，大多数大一统理论都能预测到它——但只有在中微子是马约拉纳粒子的情况下，它才会有效。换句话说，不允许另外有一个不同的反中微子。

惰性中微子也在遭受着实验的围攻。南极冰立方中微子探测器的结果排除了惰性中微子在一定质量范围内存在的可能性，尽管较重的

中微子仍然可能存在。

不管下一代探测器的结果将会支持马约拉纳中微子的存在抑或相反，它们都将使我们更近一步地理解中微子所涉及的怪异而奇妙的过程。希望我们不要等到宇宙的大限之日才发现它。

中微子暗示了为什么反物质没有炸毁宇宙

两项旨在研究中微子行为的实验可能会提示我们，为什么在早期宇宙中物质会打败反物质。

日本的T2K（意为“东海到神冈”）实验观察了粒子在东海（日本地名）的日本质子加速器研究复合体和295千米外超级神冈中微子探测器之间运动时，在电中微子、 μ 中微子和 τ 中微子之间的振荡。2013年，研究小组宣布，他们发现，当 μ 中微子到达超级神冈时，它已经变成了电中微子。然后，他们用反中微子进行实验，看看普通粒子和反物质粒子的振荡方式是否存在差异。2016年7月，加拿大多伦多大学的田中裕久发表报告称，反物质的版本似乎不太容易改变：变成反电中微子的反 μ 中微子数量减少了。

就其本身而言，T2K的结果并没有很强的统计意义，但是它得到了“主注入器中微子”相似实验结果的支持，“主注入器中微子”是一个在伊利诺伊州和明尼苏达州之间发送中微子的实验。如果结果得到证实，这种不平衡也许就物质何以在137亿年前取得胜利的问题给予我们提示。

世界上最强大的中微子探测器

为了研究难以捉摸的中微子，人们投入了一些重量级的技术——在日本、加拿大、美国、德国和中国。

•日本超级神冈探测器

中微子很少与物质相互作用，因此需要大规模的实验才能发现它们。日本超级神冈实验的核心是一个巨大的不锈钢水箱，直径39米，装满了5万吨纯净水。在中微子与水相互作用的罕见情况下，它会产生带电粒子，然后产生闪光。水箱周围有超过1.3万个灵敏的光探测器监视着这些闪光。超级神冈表明中微子在传播过程中会从一种类型转变成其他类型，就像草莓奶昔转变成巧克力或者香草奶昔一样。

•加拿大萨德伯里中微子监测所

该设施位于加拿大安大略省一个镍矿地下2千米处，像超级神冈一样，深埋地下使它不会受到宇宙射线的干扰。在2006年关闭实验之前，它的容器内装满了1000吨的重水，并以和超级神冈差不多的方式发现了中微子。萨德伯里中微子监测所的专长是发现来自太阳的中微子。该实验的负责人阿瑟·麦克唐纳因发现中微子具有质量而荣获2015年诺贝尔物理学奖。

•美国液体闪烁中微子探测器

液体闪烁中微子探测器为中微子物理学带来了最令人困惑的结果。这项实验在新墨西哥州的洛斯阿拉莫斯国家实验室一直进行到

1998年。它的研究对象是在粒子碰撞中产生的中微子，寻找它们在三种类型之间来回转换的现象。然而结果并不符合预期：中微子仿佛消失了一样。如果存在第四种不参与相互作用的惰性中微子，结果就解释得通了。后来的实验似乎证实了液体闪烁中微子探测器的发现。然而，经过对南极冰立方中微子观测站近10万个中微子事件的分析，人们对惰性中微子的存在产生了一些怀疑。

•德国卡尔斯鲁厄氚中微子实验

中微子曾被认为是无质量的，但是它们从一种类型转换到另一种类型的能力表明这是不可能的：中微子确实有质量，尽管低得令人困惑。多年来，研究人员一直试图测量这个质量，但是他们的设备不够灵敏。或许卡尔斯鲁厄氚中微子实验能拥有足够的灵敏度。位于德国卡尔斯鲁厄的探测器将观察氚的衰变，氚会产生一个中微子、一个电子和一个氦-3原子核。虽然中微子不会被探测到，但是它的质量可以根据电子的能量和动量计算出来。

•中国大亚湾中微子实验

大亚湾实验位于香港以北50千米处，研究从附近两座核反应堆涌出的反中微子。团队在2012年发表了他们的第一个结果，完善了对中微子和反中微子如何改变味的理解。它独特的设计为未来的实验铺平了道路，比如江门地下中微子实验基地。该基地位于中国开平，比大亚湾实验的规模还要大得多，其建造工作从2015年开始，预计2020年将会有初步成果。

采访：寻找来自深空的中微子

2014年，加拿大多伦多大学的天体物理学教授瑞·杰雅瓦达纳告诉《新科学家》杂志，通过研究来自外太空的中微子，我们如何对宇宙中一些最剧烈的过程有了新的认识。

中微子有什么有趣之处？

它们的基本粒子，具有相当奇特的性质。它们几乎不与物质发生作用，这使得它们很难被发现。每秒钟有数以万亿计的中微子穿过你的身体，可是在你的一生中，某个中微子与你体内的一个原子发生相互作用的概率大概只有25%。

它们来自哪里？

有些来自太阳的中心，有些是宇宙射线撞击高层大气原子时产生的，还有在地球内部随着放射性元素衰变而产生的地中微子。穿过地球的中微子绝大多数都来自这三方面。但是人们对于探测来自更远地方的中微子——宇宙中微子——怀有很大的兴趣。

为什么宇宙中微子如此重要？

宇宙中一些更剧烈的现象会产生中微子，所以有一些非常基本的问题我们可以通过研究宇宙中微子来探求答案。不过到目前为止，我们只检测到两批。第一批来自超新星1987A，这是一颗在银河系的伴星系中爆炸的恒星。最近，位于南极洲的冰立方中微子观测站报告了大约28个高能中微子，几乎可以肯定它们来自宇宙。

冰立方的探测有多重要？

它标志着中微子天文学的开始。天文学不同于其他科学。一般来说，我们没法把猎物放在显微镜下，也不能在实验室里进行分

析，我们只能依靠远处微弱的光源。到目前为止，我们已经比较充分地研究了电磁波谱。其他的宇宙信使我们只知道两个：引力波和宇宙中微子。

冰立方中微子的可能来源是哪里？

两个候选源是位于星系中心的超大质量黑洞和 γ 射线暴，它们可能是由大质量恒星死亡产生的。

宇宙中微子还能揭示什么？

宇宙大爆炸几秒钟后就应该已经有中微子产生了。凭借现有的天文学手段，我们只能追溯到大爆炸后38万年左右。如果我们能够探测到这些残留的中微子，我们就能回望到宇宙刚刚诞生的几秒钟内。问题是它们现在的能量很低，因此很难被探测到。目前的探测器灵敏度还远不足以看到它们。

中微子能像希格斯玻色子那样引起公众的想象吗？

希格斯粒子已经成了一则绝佳的故事。但是中微子让我们能够探索一些非常重大的问题，我认为这才是它们真正的有趣之处。它们已经准备好登上舞台中央。

7 致命的轻量级

希格斯玻色子的质量小于预期。这个事实可能会给我们整个宇宙带来灾难。

希格斯粒子，不过并非我们所知的那种

2012年的希格斯玻色子狂欢之后，粒子物理学家一直在扪心自问：这个粒子是否真的是标准模型的关键组成部分？如果是，我们真的想要它吗？

随着标准模型逐渐成形，找到这种粒子变得越来越紧迫。该模型要求在非常早期的高温宇宙中，电磁力和弱核力是统一的。只是到了大爆炸后十亿分之一秒或者更早一点，希格斯场出现的时候，这两个力才分裂。这一灾难性的转变被称为电弱对称性破缺。W玻色子和Z玻色子变胖，退到了亚原子的范围内。与此同时，没有质量的光子跑开，而电磁力则获得了目前这种无边无际的作用范围。与此同时，构成物质的基本粒子——如电子和夸克，统称为费米子——与希格斯场相互作用，也获得了它们的质量。从一片无质量的混乱中，一个有着一套质量等级的有序宇宙出现了。

这是个不错的故事，但有些人觉得它有点做作。问题在于，标准模型显然是不完整的。标准模型的缺陷表明，我们需要的根本不是一个标准的希格斯玻色子，而是某种与之有着微妙的或者根本性区别的东西——一把通往更深层次理论的钥匙。

身份问题

到目前为止，希格斯玻色子似乎稀松平常得令人沮丧。这颗诞生于2012年7月4日的粒子是在欧洲核子研究中心大型强子对撞机强大的超环面仪器和紧凑 μ 子线圈内部，通过筛选数万亿次质子碰撞的碎片

而发现的。首先，人们发现它衰变为W玻色子和Z玻色子，这正符合人们对于赋予它们质量的粒子的期望。

除此之外，一个标准模型的希格斯粒子（见图7.1）不仅要衰变为传递力的玻色子，还要衰变为制造物质的费米子。这里的水就有点混浊了。人们也见过这种粒子衰变成两个光子，这间接地证明了它与最重的夸克——顶夸克——发生了相互作用。根据理论，希格斯无法直接与光子交互，因为它没有电荷，所以它首先分裂成一对顶夸克及其反夸克，然后这两者再辐射光子。

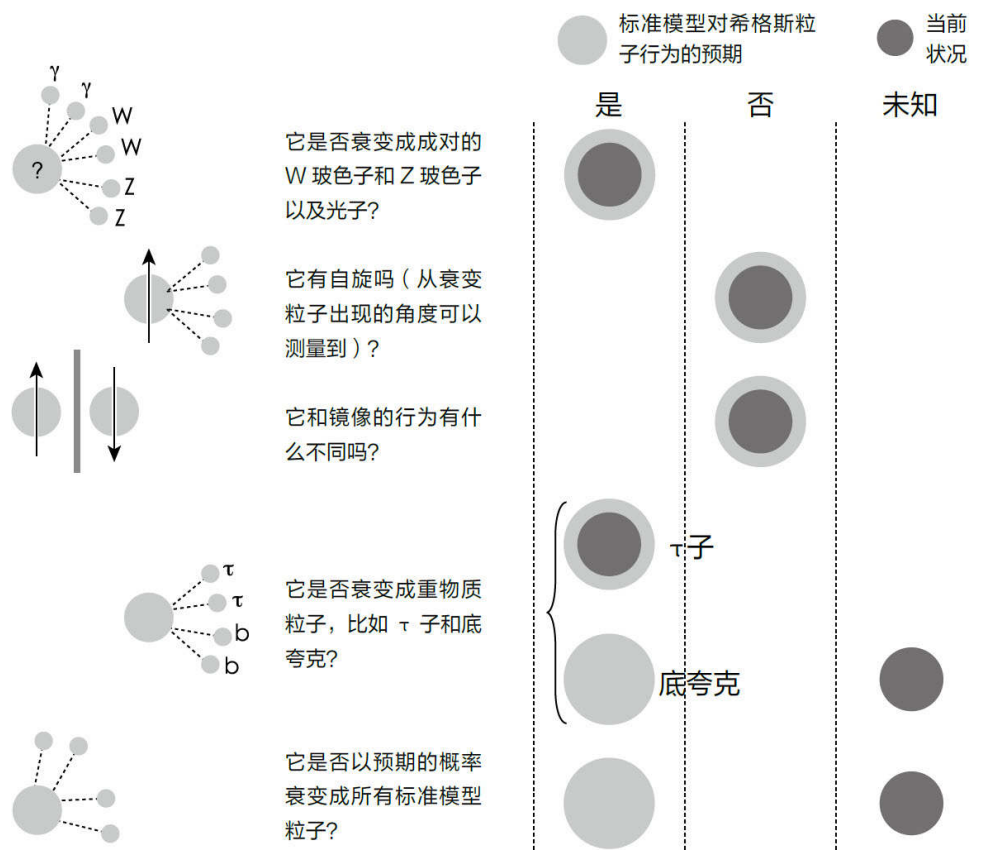


图7.1 走向希格斯：标准模型希格斯玻色子必须满足若干条件。任何与预期行为不符的现象都可能暗示着某种久被期待的新粒子

现在我们还无法得出任何坚实的结论。我们对新粒子的质量相当了解（大约1250亿电子伏特，即223亿分之一微克），如果它是标准的希格斯粒子，这就决定了它衰变为各种粒子的速率，误差大约在1%以内。然而，由于到目前为止观测到的衰变数量有限，新粒子衰变率的测量不确定度更接近于20%。大型强子对撞机将继续努力15年到20年，以改进这一结果。

目前而言，我们只剩下一个看起来像是标准希格斯粒子的粒子，尽管我们还不能给出一个确凿无疑的证明。于是我们面对的是一头站在加速器隧道里面的大象：如果它是标准的希格斯粒子，它又怎么可能存在呢？

问题在于量子场论的预测，即通过从真空中借用能量，粒子会自发地吸收和发射虚粒子。因为希格斯玻色子本身会从它接触到的所有物体中收集质量，这些过程会使它的质量从 10^{11} 电子伏特的区间膨胀到 10^{28} 电子伏特。到了这时，粒子的质量已经进入了普朗克尺度，基本力变得疯狂，引力——所有这些力当中相对较弱的一个——变得和其他所有力一样强大。结果就是一个充满黑洞和扭曲时空的高应力宇宙。

寻找共谋者

避免这场灾难的一种方法是设定虚粒子涨落的强度，使它们全部抵消，从而令希格斯粒子的质量得到控制，宇宙更像是我们看到的樣子。要想在理论尊严多少得以保全的前提下做到这一点，唯一的方法是引入一场由自然界某种合适的新对称所带来的共谋。目前，大多数物理学家在超对称理论（[见第8章](#)）预言的假想超对称粒子身上看到了

共谋者的潜质。每个标准模型粒子都有一个与之配对的超对称粒子，而这些粒子的涨落恰好相互抵消。这些粒子必须很重：大型强子对撞机和早期粒子加速器一样，已经证明了它们的质量不可能低于某个值，目前这个值大约是假定的希格斯粒子的10倍。

这已经给哪怕最简单的超对称模型带来了巨大的压力。如果找不到质量小的超对称粒子，你可以调整理论，让它们带着较高的质量出现——然而我们也不能把标杆挪得太远。如果超对称粒子变得太重，它们稳定希格斯粒子质量的方式就会让人觉得不太自然了。超对称粒子还作为宇宙中缺失的暗物质的候选补位者受到了热烈追捧。其他的选择包括一些更加激进的粒子，比如那些存在于额外空间维度的粒子。

如果标准模型咬定的能量与量子场理论和爱因斯坦引力理论都失效的普朗克尺度的能量之间，差距大得根本没法调和，那又当如何？那样的话，我们该如何解释希格斯粒子的实际质量与量子理论预测的质量之间的巨大差异呢？一种叫作轴子的轻量假想粒子可能会防止希格斯粒子的质量膨胀（见下文）。

或者我们只管接受希格斯粒子目前的质量就是了？如果不是这样，所有粒子的质量和它们之间相互作用的强度就会非常不同，我们所知的物质就不会存在，也就不会有我们在这里担心这些问题。这种人择原理，也就是用我们的存在来排除宇宙中某些本来可能存在的属性，常常与多元宇宙的概念联系在一起——多元宇宙的概念是，存在着无数的宇宙，所有其他可能的物理现象都在各自的宇宙里发生着。

对许多物理学家来说，这样的论证实属似是而非。但是别管希格斯粒子的质量是不是已经被我们存在这一事实确定了，它都可能威胁

到我们的未来，我们将会看到这一点。

宇宙灾难的边缘

我们的宇宙已经存在了近140亿年，但它可能会在眨眼间消失。如果时空结构处于物理学家所说的“假真空”的不稳定状态，那么它随时都有可能崩塌，把我们也连累进去。希格斯玻色子保持着宇宙的稳定——刚刚好。如果赋予质量的粒子更轻，宇宙就会迅速坍缩。

理解真空有多稳定的关键在于希格斯粒子、玻色子及其相关场。基本粒子通过与希格斯场相互作用获得质量，而希格斯玻色子的质量也取决于这些粒子。其中最重的是顶夸克，它对希格斯粒子的影响最大。根据最近对这两种粒子质量的测量，物理学家现在可以利用希格斯场的性质来推断时空真空的状态。他们得到的消息不是太妙：我们的宇宙似乎命悬一线。

就像一枚从山上滚下来的球，真空最终会停留在尽可能低的能量状态。然而，如果在半山腰有一条小沟，球就会被卡住。球会获得一定的稳定性，但也有进一步向下滚动的可能。看起来我们可能正处于这样的一条沟中（见图7.2）——尽管测量数据还不够精确，不能确定。

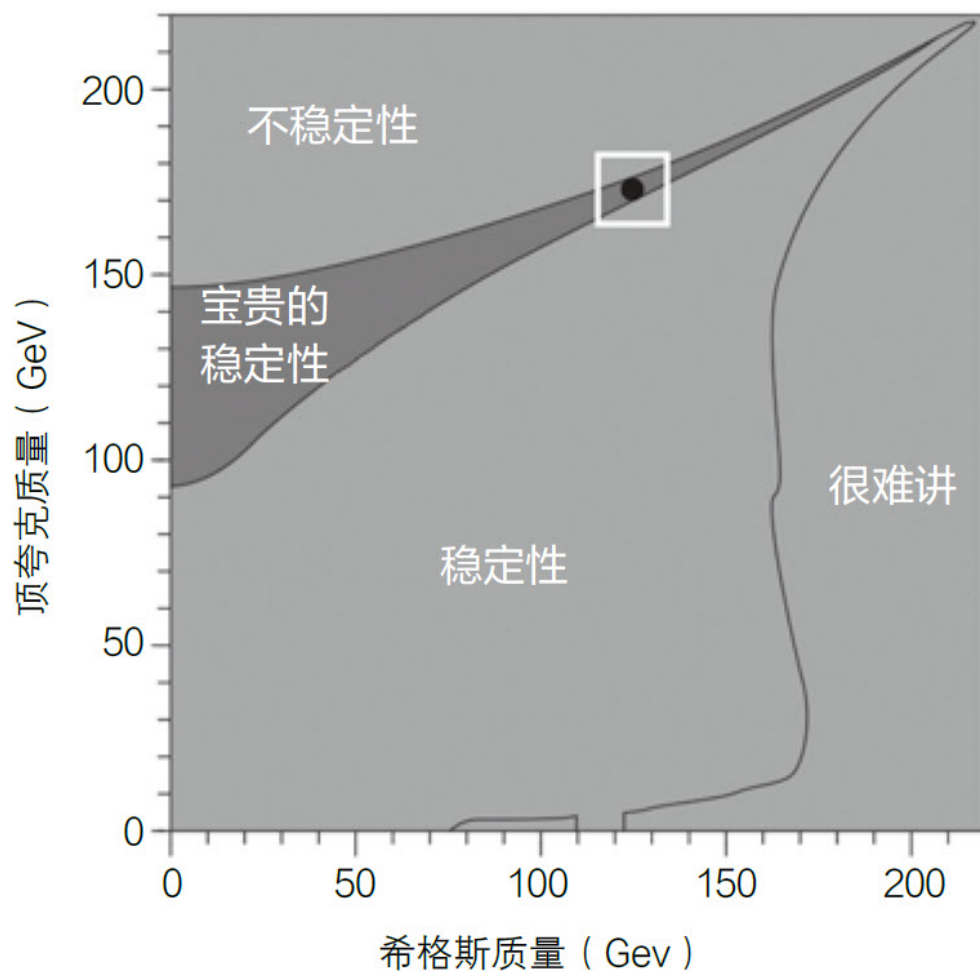


图7.2 如果顶夸克相对于希格斯玻色子稍微重一点，宇宙早就崩溃了

希格斯粒子质量之谜

如果我们相信标准模型——我们最好的粒子物理学理论，那么一粒尘埃应该和一头吃得很好的大象一样重。这是因为它预测希格斯粒子应该有着巨大的质量，而这个质量反过来又会使其他基本粒子——电子、夸克和中微子等——比我们测量到的结果重10亿亿倍。几十年来，这个“级列问题”一直困扰着物理学家，从来没有一个简单的答案。我们最好的模型无法解释为什么赋予其他粒子质量的希格斯玻色子质量这么小。

重新提出40年前的一个想法，可能会让这个谜题和另外两个谜题得到解答。由于大型强子对撞机一直没能发现证据，超对称性这一古老的领跑者已经失宠，但答案可能一直就在我们的鼻子底下。理论物理学家们在20世纪70年代提出的一个假想玩物可能会使这个问题消失。

在量子力学的规则下，希格斯玻色子可以暂时转变成各种各样的其他粒子，在这个过程中获得它们的质量。把这些量子涨落的影响加起来，我们得到希格斯粒子的质量大约是 10^{28} 电子伏特——大致相当于一根睫毛。我们知道它的质量不可能这么大，因为这会反过来使其他粒子超重。当大型强子对撞机的研究人员发现希格斯粒子的质量只有区区1250亿电子伏特时，这就证实了我们对希格斯粒子的了解中存在着巨大的缺失。

要解释这个巨大的差异，一个简单的办法是假设它有某种内禀质量，不受所有量子涨落的影响，而且这个质量也非常大。那么所有对

整体质量的单独贡献几乎都相互抵消了，剩下的就是我们实际测量的质量。

宇宙比例的巧合

两个毫不相关的巨大数字几乎完全抵消的可能性有多大？从这个角度看，级列问题是一个宇宙比例的巧合。这有点像是把高尔夫球击向果岭，却看到它蹭到一棵树，偏进了一个沙坑，反弹到湖里，然后又反弹到你击球的球杆旁边。如此渺茫的概率不仅仅局限于玻色子。因为所有基本粒子的质量都与希格斯粒子成比例，所以这个问题几乎影响了一切。

理论物理学家们喜欢超对称理论，因为它似乎提供了一种解决方案。但是如果它预测的超对称粒子一直不出现呢？

2014年，卡普兰在加州大学伯克利分校的同事苏尔吉特·拉贞德兰和斯坦福大学的彼得·格拉姆设计了一种新的实验来检测另一个选项：轴子。如果存在，轴子将是一种电中性的轻粒子，会产生自己独特的力。它们是在40多年前首次被提出，用来解释棘手的强CP问题，这个问题问的是为什么强力能保持CP对称，而弱力却不能。它们也是暗物质的主要候选者。

目前设计出来的轴子探测器都还没有任何发现。拉贞德兰和格拉姆曾经提出一个新设计，正准备申请建造资金的时候，一个团队声称，利用南极附近的宇宙泛星系偏振背景成像望远镜，他们发现了寻找已久的宇宙早期快速膨胀时期的证据。这似乎排除了轴子存在的可能性，然而拉贞德兰不那么肯定。他最终解决了如何将这一观测结果

与轴子的存在相容的问题。它需要轴子在早期宇宙中有较大的质量，然后逐渐消失。

后来宇宙泛星系偏振背景成像望远镜团队的说法被证明是错误的，但是这件事引发了拉贞德兰的思考。如果轴子的质量可以随着时间的推移而减少，那么这是否也适用于其他粒子，比如希格斯玻色子？拉贞德兰、格拉姆和卡普兰将这一想法应用到级列问题中，认为轴子和希格斯粒子的质量是相关联的，就像一根轴上的两个轮子。这两种粒子最初都可以在早期宇宙中拥有标准模型预测的巨大质量，然后缓慢地走下坡路。

为什么希格斯粒子的质量止于1250亿电子伏特，而不是继续下降呢？研究小组的想法是，只有当希格斯粒子的质量下降到某一特定值以下时，希格斯粒子赋予质量的性质才会生效。而这件事一旦发生，它的质量也就固定住了。希格斯玻色子突然给予夸克质量，夸克通过强力与轴子相互作用。这就限制了轴子的质量，进而限制了希格斯粒子的质量。

研究小组建议将轴子（axion）的名字改为“松子”（relaxion），因为它可以使希格斯粒子的质量很好地“松弛”到它的观测值。尽管看上去有些做作，但是相对于解决级列问题的其他方法，松子的想法确实有一个优势。现在已经有探测器在寻找轴子了，比如最近在华盛顿大学西雅图分校开展的改进轴子暗物质实验。

格拉姆、卡普兰和拉贞德兰正在研究一个大胆的新想法。松子理论能解开第四大谜团吗？宇宙学常数是物理学家用于代入方程的数字，表示将空间推开、使宇宙膨胀的暗能量。符合观测结果的膨胀速

率需要一个非常小的数值，然而量子场论则暗示它应该非常庞大。这个矛盾也许可以用类似的松弛论证来解决。

希格斯玻色子诺贝尔舞会

2013年12月，彼德·希格斯和弗朗索瓦·恩格勒共同获得诺贝尔物理学奖，《新科学家》杂志的瓦莱丽·贾米森受邀参加颁奖典礼。下面是她对那次经历的描述。

“科学家们都梦想接到斯德哥尔摩打来的电话。我是在用吸尘器打扫客厅时接到的。‘你愿意来参加宴会吗？’一位诺贝尔基金会的人问道。我心里乐开了花。我没有获得诺贝尔奖，但是这一场颁奖典礼是任何一位对宇宙感兴趣的人都会喜欢的，因为这次奖励的是对物质组成构件获得质量机制的发现。

“对我个人来说，这也很有意义。在希格斯粒子被发现之前很久，我就进入过现在大型强子对撞机所在的隧道，漫步于质子很快将以光速撞到一起的地方。抬头看着几层楼高的超环面仪器和紧凑 μ 子线圈，我真是感到了自己的渺小。它们将会开展捕获希格斯粒子的工作。当第一批质子在2008年发射时，我又回到了那里。参加诺贝尔颁奖典礼是下一个篇章。

“12月10日，当我到达斯德哥尔摩音乐厅时，我意识到这是瑞典的奥斯卡颁奖典礼——人群簇拥在外面的广场上，入口处有两名裸体抗议者。里面就像一场物理学界的明星聚会，也是一部我们对宇宙中的粒子和力提出的最优理论——标准模型的活历史。

“那里有卡洛·卢比亚，他发现了W粒子和Z粒子，因此获得了1984年诺贝尔物理学奖。这两种粒子携带造成放射性衰变的弱力。我还认出了格哈德·胡弗特，他因为驯服了标准模型难以处理的方程式而在1999年获奖；还有2004年的获奖者戴维·格罗斯和弗兰克·威尔切克，他们获奖的缘由是对保持着原子核凝聚不散的强力的研究。

“这些人建立了标准模型，但是在希格斯粒子被发现之前，模型并不完整。恰好，我不得不等到晚上最后一刻才见到彼得·希格斯。他和恩格勒正在领导一场反对着装规定的斗争：‘他们想让我们穿这些可笑的鞋子。我和弗朗索瓦发动了一场反抗运动。’希格斯说，‘我想我们可能会被赶出去。’”

8 超对称粒子以及更多

标准模型似乎有些步履蹒跚，下一步该怎么办？物理学家们正焦急地扫视着地平线，寻找前所未见的古怪粒子。

大型强子对撞机真正正在寻找的是：超对称性

2012年希格斯玻色子的发现标志着粒子物理学家修建了半个世纪的大厦——标准模型——成功封顶。但是自那以后，随着大型强子对撞机持续运转并不断提升粒子的能量，粒子物理学家由于没有新的发现而越发地感到焦虑。我们知道标准模型是不完整的。它对第四种基本的自然力——引力——只字未提；对暗物质的性质保持沉默；需要微调才能将希格斯玻色子的质量降到可控范围内（[见第7章](#)）。所以这个模型必须被纳入一个更大的模型之内。如果在希格斯玻色子之后，大型强子对撞机再也找不到更多的东西，粒子物理学就会陷入死胡同，找不到下一步的方向。

最重要的是，物理学家希望能为囊括一切的超对称性理论找到证据，让它们走上统一之路。在今天的宇宙中，标准模型中的三种力有不同的强度和范围，但是在20世纪60年代，当时在哈佛大学的斯蒂芬·温伯格与阿布杜斯·萨拉姆以及谢尔顿·格拉肖一道证明了，在早期宇宙中普遍存在的高能状态下，弱力和电磁力有相同的强度。事实上，它们是统一的同一种力。人们的期望是，如果你朝着大爆炸回溯到足够早的时间，强力也会屈服，并与电磁力和弱力统一在单独的一个超力中（见图8.1）。标准模型可以做到这一点——但是只能近似地实现。这种不太准确的统一很快就开始让物理学家们感到困惑。

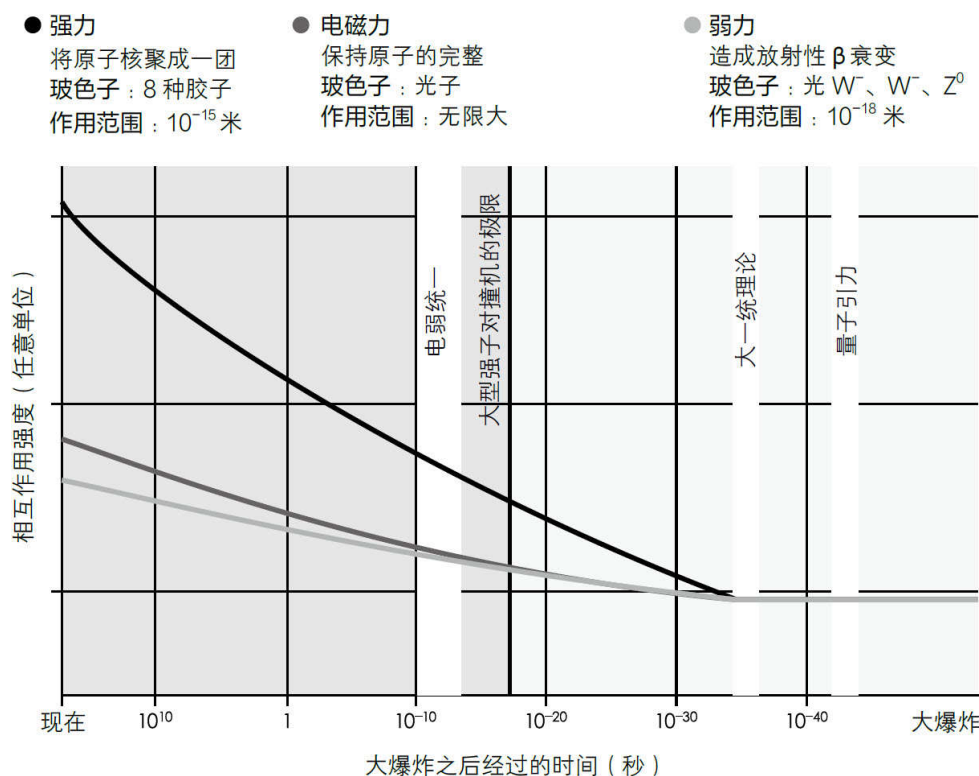


图8.1 我们今天所知的力强度差别很大。但是如果我们可以把时间回溯到大爆炸，或者在粒子加速器里面模拟它的状态，我们就可以看到它们的强度趋同，最终统一成一个超力

然后超对称闪亮登场。它首次出现在苏联物理学家尤里·高尔方和叶夫根尼·利希特曼的研究成果中。德国卡尔斯鲁厄大学的朱利叶斯·韦斯和加州大学伯克利分校的布鲁诺·祖米诺在几年后使它受到了更广泛的关注。

超对称的目的是扩展物理学家喜爱的简化原理——对称性，并证明粒子域分裂成费米子和玻色子是存在于早期宇宙中的对称性破缺的结果。今天，每个费米子都将与一个质量更大的超对称玻色子配对，每个玻色子也拥有一个费米子超级兄弟（见图8.2）。例如，电子有标量电子（一个玻色子）作为它的超对称伙伴，而光子与光微子（一个费米子）为伴。

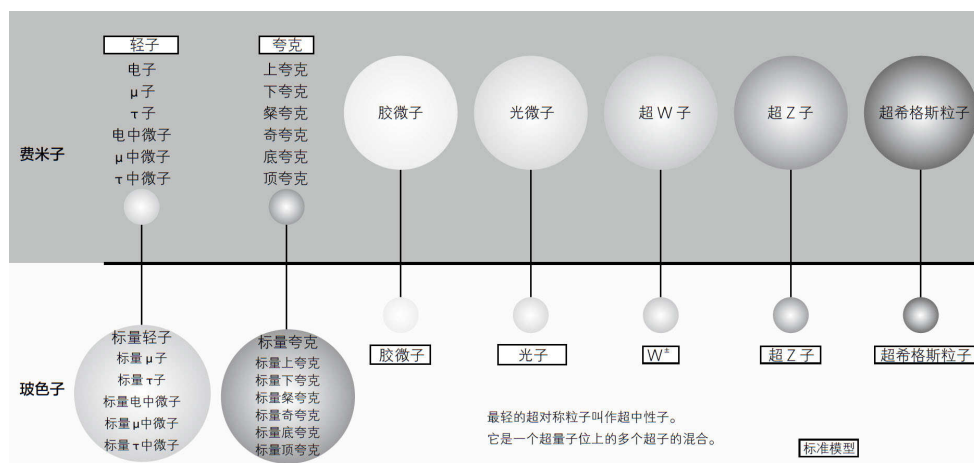


图8.2 超对称粒子大家族。粒子的数量得以翻倍，每个费米子都有一个大质量玻色子作为其超级伙伴，反之亦然

该理论的关键在于，在早期宇宙的高能汤中，粒子和它们的超级伙伴是无法区分的。每一对都作为单个无质量实体共存。随着宇宙的膨胀和冷却，这种超对称性被打破。组成超级搭档的双方分道扬镳，成为各自拥有独特质量的独立粒子。

超对称性解决了所谓的级列问题（[见第7章](#)），也就是说，根据量子场论，希格斯粒子和其他粒子本该具有巨大的质量。超对称性理论可以解决希格斯粒子与那些导致其质量失控的基本粒子相互作用所带来的所有麻烦。它们只不过是受其超对称伙伴的贡献抵消了。随着超对称性的加入，代表这三种力强度的曲线可以在早期宇宙中以惊人的精确度组合在一起。

这足以使许多物理学家转变为真正的信徒。但是当他们开始研究新理论提出的一些问题时，事情就变得非常有趣了。

寻找超对称粒子

一个紧迫的问题是超对称粒子目前的下落。电子、光子之类的粒子在我们身边比比皆是，然而无论是在自然界中还是在加速器实验中，都没有标量电子和光微子的迹象。如果这样的粒子存在，它们的质量肯定非常大，需要大量的能量来制造。

如此巨大的粒子会衰变为由最轻、最稳定的超对称粒子构成的残留物，这种粒子被称为超中性子。超中性子不带电荷，通过弱核力与正常物质羞怯地相互作用。毫不奇怪的是，到目前为止，它还没有被发现。

当物理学家们精确地计算出应该有多少超中性子残留物时，他们很是吃了一惊。结果是一个巨大的量——远远超过宇宙中所有的正常物质。超中性子似乎符合了暗物质应该具备的所有特征，而天文观测令我们相信，暗物质在宇宙占据着主导地位。

所有这些似乎都表明，理论中隐藏着一些基本真理。然而数学的美和承诺是不够的：你还需要实验证据。在那些旨在发现和描述穿过地球的暗物质的实验中，人们或许可以发现超对称性的间接证据。这其中包括在加拿大萨德伯里附近的一个矿井中进行的超级低温暗物质探索实验，以及在意大利中部格兰萨索山下进行的XENON1T实验（XENON意为“氙”，XENON1T是XENON暗物质计划中数个探测器之一）。美国国家航空航天局的费米卫星这样的太空探测器也在银河系中搜寻着两个超中性子相遇并湮灭时可能产生的信号。

如果我们能在加速器中制造超中性子，最有力的证据便会浮现。由于超中性子几乎不与其他粒子相互作用，所以它会躲过探测，但这反倒可能使它们更容易被发现，因为它们携带的能量和动量看起来丢失了。

我们还没有完全确定这个加速器需要多强大。超对称伙伴的质量精确地取决于超对称性的破缺发生在宇宙冷却过程中的哪个时刻。但是根据最简单、最美观的超对称理论形式（被称为约束极小），夸克的超伙伴（超夸克）的质量低于1万亿电子伏特。这正好在大型强子对撞机的能量范围内——然而它还没有探测出过这种粒子。出了什么问题？

普通超对称理论

迄今为止，在大型强子对撞机上对超对称粒子的搜寻工作主要集中在“超顶夸克”身上，也就是标准模型中顶夸克对应的超夸克。在超对称理论的大多数版本中，超顶夸克是最轻的超夸克。在“最基本”约束极小超对称理论中，其他的超夸克也并不比它重很多。它们都应该在大型强子对撞机上产生，其中较重的那些会衰变为超顶夸克，形成难以忽视的超顶夸克洪流——而这恰恰就是我们一直没有观测到的。

也许我们需要考虑更加复杂的超对称理论版本，那些需要更多的假设和自由参数才能有效的版本。其中一些允许在大型强子对撞机还没有测试过的区间存在质量更大的超夸克和超胶子，同时仍然给出了低于1万亿电子伏特的超顶夸克质量。如果这些模型是正确的，大型强子对撞机产生的较重的超夸克数量就会少得多，甚至可能根本不会产生。然后我们只需要改进搜寻方式，例如，寻找直接产生，而不是作为某个更重粒子衰变产物的超顶夸克。

突然之间，人们开始讨论在超对称模型中对一大堆自由参数进行微调，以期获得正确的结果——而避免这样的敷衍了事原本是人们提

出超对称理论的目的。这便引出了一个更激进的结论：或许超对称理论已经无可救药了？

一些物理学家已经在重新审视可能取代它的旧模型（见图8.3）。其中有前一章讨论的轴子理论。此外还有现在供职于奥斯汀市得克萨斯大学的斯蒂芬·温伯格提出的想法。1979年，他与斯坦福大学的莱昂纳德·萨斯坎德合作，以乏味的质子作为立论的出发点。质子是由被胶子绑定在一起的夸克构成的，胶子负责传递强核力，然而质子大部分的质量不是来自夸克而是来自内部的绑定蕴含的能量（[见第4章](#)）。这些色荷的相互作用是强核力在当今宇宙低能状态下的表现。温伯格和萨斯坎德推断，如果在早期宇宙中，类似的机制能够在更高的能量条件下生效，那就可以解释为什么像夸克这样的基本粒子本身就具有质量，而不需要希格斯粒子。这是一个光明的新前景，他们称为“艺彩理论”。

标准模型



艺彩理论方案



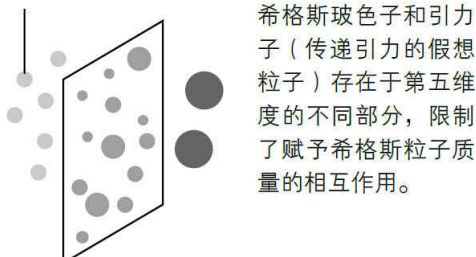
好处：不是超对称理论
坏处：数学计算困难

超对称理论方案



好处：优雅
坏处：没有找到证据

额外维度方案



好处：数学计算简单
坏处：概念上晦涩

图8.3 理顺级列问题：标准模型及其替代选项

但是艺彩理论的数学推导很困难，而且它提出的少数可验证预测也并不怎么符合大型正负电子对撞机的实验结果。在2001年之前，该对撞机一直是欧洲核子研究中心的主要加速器。通过对该理论进行微调，人们缓解了其中的一些问题，但是艺彩理论的光环还是很快就褪去了。

引力为什么那么弱？

20世纪90年代末，拉曼·桑德拉姆与哈佛大学的丽莎·兰德尔提出了另一个选项。级列问题与希格斯粒子的质量膨胀到远超其他已知粒子的质量有关，但是它也可以有另外一种阐述方式：为什么标准模型没有涵盖的引力比其他力弱得多？例如，电磁力比它要强将近 10^{34} 倍。如果引力更强，那么通过希格斯机制获得质量的粒子质量就会更接近希格斯粒子，问题便会迎刃而解。反过来说，如果能找到一个理论，内含对引力如此弱的解释，问题也就解决了。

兰德尔和桑德拉姆的数学推导为我们期望的引力较弱状态提出了一个新的解释：在我们的四维时空之外，还有一个看不见的第五维度。在这幅图景中，我们就像生活在一张纸的二维平面上的蚂蚁。它们四处奔波，却没有意识到它们的世界也有一个极小的三维空间，也就是纸的厚度。兰德尔-桑德拉姆模型表明，那些调节引力的粒子、引力子，更喜欢居住在五维宇宙的一条维度上——你可以理解为纸张的侧面。与此同时，希格斯玻色子却在我们所在的维度。这限制了引力子与电子、夸克等通过希格斯机制获得质量的粒子之间的相互作用，

因此，在我们四维的时空近似中，引力显得很弱。在一个完整的五维视图中，它和其他所有力一样强大。

有人建议我们应该把艺彩理论和兰德尔-桑德拉姆模型结合起来。1997年，新泽西州普林斯顿高等研究院的胡安·马尔达塞纳证明了，如何通过增加一个额外的维度，便令四维时空（比如我们的时空）中难缠的强相互作用理论变得容易处理了。兰德尔和桑德拉姆认为，这可以在他们的理论和艺彩理论之间架起一座桥梁。自那时起，他们一直在研究相关细节。

与艺彩相近的理论当中，最有希望的一个并没有完全排除希格斯玻色子，但是认为它不是一种基本粒子，而是由其他新的基本粒子组成的一种“束缚态”，就像质子实际上是一群被束缚的夸克和胶子。它预测了作为合成粒子的希格斯粒子如何衰变，而大型强子对撞机应该能够对此展开测试。它还预测了新的粒子：已知粒子质量大于1万亿电子伏特的共振态，这些粒子因为在第五维度的振动而具有额外的质能。

人们希望，欧洲核子研究中心的庞然大物或许还能找到一些东西——超对称理论的超顶夸克、兰德尔和桑德拉姆的共振，或者一些完全不同的东西——为建立一个更新、更全面的物质理论指明道路。

阴影世界：我们第一次窥见黑暗力量？

想想暗物质猎手吧。根据对星系和星系团旋转方式的宇宙学观察，这种难以捉摸的物质构成了宇宙物质的大部分。然而每当物理学家就要抓住它时，它都会溜走。他们观察不到预期的信号，或者发现了一些令人兴奋的东西，却又看着它消失在背景噪声中。每次都是一样的结果：他们换上一副强颜欢笑的表情，回到画板前面，重新开始寻找。

现在可能是时候改变策略了。也许我们要寻找的不该是单一种类的暗物质粒子，而是一个由黑暗粒子和力组成的“动物园”——一个全新的“黑暗部门”。毕竟，我们没有理由认为暗物质的复杂程度会比不上我们称之为普通的可见物质，而普通物质包含了从电子到夸克的各种粒子。

人们在讨论一个完整的影子世界。在这个世界里，看不见的粒子通过恒星、行星以及我们自己等普通物质所感受不到的力相互影响。如果实验室中出现了黑暗力量经得起推敲的微弱迹象，那么这个黑暗领域可能已经显露出来了。

早在20世纪30年代，天文学家就发现，根据可见的恒星产生的引力作用，星系之间相互绕转的速度要远远比预期快。40年过去了，我们发现星系内的恒星似乎也旋转得太快了。在对宇宙的模拟中，普通物质的引力不足以让它们在原始气体中凝聚成星系和星团。要么是牛顿和爱因斯坦提出的万有引力定律需要实质性的改写，要么是某种看不见的物质形式产生了更大的引力分量。大多数天文学家倾向于第二

种选择——暗物质。他们计算出暗物质与正常可见物质的质量之比约为4:1。

不管这种东西是由什么构成的，它必须有质量，这样它才能感觉到并产生引力。但是它没有电荷，所以不与光发生相互作用。几十年来，最主要的候选粒子一直是弱相互作用大质量粒子。人们通常认为它比质子重得多。它可能就是超对称理论中的超中性子，一种可能大量产生于大爆炸的最初时刻的稳定粒子。

寻找弱相互作用大质量粒子

附近某个矮星系在 γ 射线波段的辉光可能含有一些这些粒子存在的证据（参见下面的“弱相互作用大质量粒子的蛛丝马迹？”），但是在地球上，众多极其灵敏的探测器却不曾记录下一个弱相互作用大质量粒子。在一些研究人员看来，是时候改弦更张了。

我们考虑更夸张选项的理由还不止于此。我们现在对星系旋转的观测可以细致到足以弄清楚暗物质在星系中的分布。简单的弱相互作用大质量粒子模型表明，它在星系中央的密度应该非常大。然而，最新的观察结果表明，它的分布较为均匀。对此现象的一种解释是，某种只在暗物质粒子之间起作用的力将它们推散了。

这是个颠覆性的想法。加州大学欧文分校的冯孝仁表示，一旦你开始考虑暗物质粒子之间的作用力，你就进入了一个全新的领域。你可以想象一个由黑暗粒子及其所有的力组成的大家庭。

黑暗家庭的想法并不是一个全新的概念。2006年，天文学家们研究了子弹状星系团，那是两个正在碰撞过程中的星系群。他们提出，

碰撞的速度太高，不可能仅仅由所涉物质——暗物质和普通物质——的引力来解释。他们认为额外的拉力一定来自暗物质粒之间的引力。

弱相互作用大质量粒子的蛛丝马迹？

暗物质可能并不像它的名字所暗示的那样黑暗。如果像大多数物理学家认为的那样，这种神秘的物质是由弱相互作用大质量粒子组成的，那么它们将具备物质和反物质两种形式。两者接触时会产生大量高能光子，即 γ 射线。

星系中往往挤满了数十亿颗恒星，因此几乎不可能排除 γ 射线的其他来源，但是在过去几年里，天文学家发现了一群附近的超暗矮星系。它们的恒星数量不超过数亿颗。人们认为这些小星系也拥有凝聚程度异常高的暗物质，使它们成为寻找其产生的 γ 射线的理想场所。

2015年，宾夕法尼亚州匹兹堡市卡耐基梅隆大学的阿利克斯·吉林格-萨梅斯和他的同事们在研究一个新发现的矮星系——Reticulum II。该星系距离地球只有10万光年。在美国航空航天局费米 γ 射线太空望远镜的观测结果档案中，他们发现了似乎过量的 γ 射线。

有人提出批评意见，认为除了Reticulum II之外，可能还有隐藏的 γ 射线源。目前人们还没有计划制造新的 γ 射线波段望远镜来提供更精确的观测，而且除非我们在附近发现更多的矮星系，好去查阅费米望远镜的档案，这将仍然只是一个太空中或许存在弱相互作用大质量粒子的诱人暗示。

携带暗力的粒子

更细致的模拟证明，子弹状星系团的碰撞速度并没有超出我们的预期。但是对暗力的怀疑从未消失。研究人员认为，地球上的粒子实验中产生的异常结果可能也暗示了暗力的存在。例如，在一种被称为 μ 子的普通物质粒子（电子的较重版本）的磁特性方面，理论和实验之间长期存在的差异，可以用携带暗力的粒子来解释。冯孝仁认为，我们可能已经在匈牙利的一个核物理实验室里找到了这种粒子到目前为止最令人信服的证据。

在位于德布勒森的匈牙利科学院核研究所，阿提拉·克拉斯纳霍凯领导着一个小组研究铍-8原子核的放射性衰变。铍是一种自然产生的轻元素，当原子核含有4个质子和5个中子时，它是稳定的。但是如果质子和中子都只有4个，同位素铍-8会在转瞬之间分裂成两个氦核。之前的实验已经暗示了这一特定衰变的某种奇怪之处，克拉斯纳霍凯和他的同事想要确定它。

为了制造铍-8，他们向极薄的锂-7薄片发射质子。铍衰变，释放出成对的电子及其对应的反物质，也就是正电子。在标准粒子理论中，大多数粒子对的发射方向应该与入射的质子束大致相同。但是匈牙利人意外地发现，有两条明显的侧流，几乎与他们预期的方向呈直角。如果说衰变创造了一个慢速运动的粒子，存在了短暂的时间，然后衰变为电子和正电子，将它们朝几乎相反的方向喷出，那么这样的行为正是应当被预计到的。

研究小组计算这个假想粒子的质量时，发现它完全不符合粒子物理学的标准模型。相反，他们的数字表明，它的质量约为1700万电子伏特——仅仅是电子质量的33倍，而且比任何弱相互作用大质量粒子都轻得多。没有任何已知的自然力能产生这样的粒子。

暗光子

经过3年的钻研，小组于2015年公布了他们的研究成果。他们把这种粒子称为暗光子。通过类比光子携带电磁力的方式，这个粒子将在暗物质粒子之间携带一种未知的力。

冯孝仁和他的同事们采信了这个结果，并寻求他们自己的解释。他们还想解决一个恼人的疑问：既然匈牙利研究小组发现这个假定新粒子的实验是世界上大多数物理实验室都能够做到的，为什么之前没有其他人注意到它呢？

除了携带暗物质粒子间的暗力外，假想的暗光子还应该携带一点普通的电磁力。因此，它应该偶尔与正常物质中的质子和电子相互作用。但是当冯和他的同事计算这种相互作用的强度时，事情变得更加复杂了。“这绝不可能是一个暗光子。”冯孝仁说，“如果是的话，我们应该在其他实验和粒子加速器中看到成百上千的其他效应。”

如果不是暗光子，那么它是什么？冯孝仁的研究小组探寻了暗粒子有可能与我们熟悉的物质发生相互作用——哪怕只是轻微的相互作用，从而引发铍反常衰变的其他方式。他们发现，要想符合我们在已知自然力的实验中所看到的一切结果，它不能像传统光子那样与质子和电子相互作用，而是必须与铍原子核内的中子相互作用。这一性质超出了我们所知的物理学范畴，这也许可以解释为什么人们在以前的

暗物质探测实验中没有发现过这种粒子。冯孝仁的研究小组称这名闯入者为“疏质子X玻色子”。

并不是每个人都相信可见物质宇宙之外还有一个完整的阴影世界，然而冯孝仁的理论是可以检验的。通过弗吉尼亚州纽波特纽斯的托马斯·杰斐逊国家加速器，暗光实验已经在冯孝仁的团队计算出的质量区域寻找粒子。欧洲核子研究中心的大型强子对撞机底夸克实验也将在夸克及其反粒子的衰变中寻找它。

制造暗物质的六种方法

1. WIMP（弱相互作用大质量粒子）。暗物质最标准的解释是，它是一大团缓慢移动的重粒子，这种粒子就是弱相互作用大质量粒子。它们当然可以帮助人们对星系旋转的方式，以及星系和星团的形成给出解释。但是目前还没有探测器确凿无疑地发现过WIMP，而且它们所看到的线索表明WIMP仅为预期的十分之一。如果真有这样的轻量级WIMP存在，它们的质量位于允许范围的最低端。

2. MACHO（大型紧凑的晕状物体）。这种观点认为，暗物质只是隐藏在星系边缘的普通物质——“巨大的天体物理紧密的晕状物体”，暗淡到看不见。候选者包括黑洞以及失败的恒星。可惜的是，MACHO只能解释宇宙缺失质量的一小部分。

3. Macro（宏）。暗物质也可能是由密集的夸克簇构成的，夸克是成对或三个一组构成普通物质的粒子。这些“Macro”可能拥有

和中子星一样的密度，而且非常重。也许有一天我们可以通过在月球上部署地震检波器来发现它们。

4. 轴子。作为WIMP的缩小版，轴子与普通物质的相互作用会更弱。尽管轴子暗物质实验等项目扩大了搜索范围，但结论仍未揭晓。

5. 惰性中微子。中微子能够穿透其他物质，几乎就像它们本身不存在一样。但是它们太轻，太敏捷，不可能是暗物质。惰性中微子会是一个更重、更冷漠的版本。

6. 引力微子。在将广义相对论与超对称理论融合的尝试中，引力子是携带引力的粒子，而引力微子则是引力子的假想超级伙伴。它正好符合暗物质粒子的条件。问题是超对称预言的许多重伴粒子都还没有存在的迹象。

古怪的粒子解决物理难题

标准模型留下了许多有待回答的问题。为什么物质在我们的宇宙中占主导地位？引力的本质是什么？什么是暗物质？为了回答这些问题，物理学家们一次又一次地采用同一条权宜之计：发明一种新粒子……

轻子夸克

1994年，在德国汉堡的德意志电子同步加速器实验室，一组物理学家正在让电子与质子迎面相撞，这时他们看到一个电子明显地变成了它较重的对应物—— μ 子。这样的转化需要电子从质子中获取能量来转化成质量——这在标准模型中闻所未闻，因为电子和质子是非常不同的粒子。质子是由强力约束而成的复合物，电子和 μ 子则是基本粒子，统称为轻子。它们根本感觉不到强力。

一种可能性是，碰撞产生了一个重量级的杂交品种，被称为轻子夸克。在一些把四大自然力中的三种糅合成一个的大一统理论中，当一个电子撞击一个质子时，就会有这种轻子夸克形成并衰变为一个 μ 子和一个夸克。

那次的结果再也没有复现过，人们的兴奋情绪也渐渐消退了。然而，大一统理论的诱惑依然存在，在今天的大型强子对撞机上，对轻夸克的探索仍在继续。

弦球

弦理论是一个能将两个不同尺度结合起来的种子选手，很受欢迎。这两个尺度分别是，标准模型当道、粒子做主角的微观量子世界，以及引力统治的宇宙级距离（[见第9章](#)）。弦理论认为，电子、夸克等粒子其实是仅有 10^{-35} 米长的能量弦，以不同的方式振动。如果是这样，大型强子对撞机或者未来的加速器可能会产生弦球。当两根弦相互撞击时，它们就会形成一团缠绕在一起的球，而不是一根被拉长的弦。如果找到了它们，弦理论便得到了证明。除了我们已知的三个维度，该理论需要更多的空间维度。

暴涨子

为什么空间如此平滑，为什么宇宙中物质的分布如此均匀？标准的解释是，宇宙在诞生后不久，经历了一段急速膨胀的时期。在这段时间里，空间的某些区域以比光速还快的速度被撕裂，所有的褶皱都被抚平了。这种膨胀背后的驱动力是一个巨大的能量场。在化作其他物质和辐射之前，它曾短暂地统治了宇宙。量子理论认为每个场都有一个相关的粒子——在这个粒子中是暴涨子。它的存在将会导出一些有趣的推论。膨胀场中的量子涨落使得完全关闭变得非常困难，因此原始宇宙的某些部分仍然在膨胀，形成一个由许多独立发展的宇宙组成的多元宇宙。

暴涨子的直接证据不会很快出现，因为它们必须有巨大的质量。你需要的加速器必须能够产生至少相当于大型强子对撞机1万亿倍的能量。

弱作用巨兽粒子

有一天，物理学家洛基·科尔伯正在伊利诺伊州的沃伦韦尔购物，思忖着该给他和同事们刚刚发明的一种暗物质粒子取什么名字。一辆公共汽车驶过，车身上贴的一张电影海报提供了答案。那是1998年，《哥斯拉》的翻拍版刚刚上映。弱作用巨兽粒子出生了。

在宇宙的第一秒内，在急速膨胀阶段，空间的扩张可能会从真空中剥离出粒子。科尔伯和他的同事计算出，其中可能有比标准弱相互作用大质量粒子重10亿倍的暗粒子，其质量相当于好几百亿亿（ 10^{18} ）电子伏特。

庞大的质量意味着，这种弱作用巨兽粒子应该是极其罕见的。就像暴涨子一样，它们不能在粒子加速器中被制造出来，也不太可能游逛到寻找弱相互作用大质量粒子的地下探测器中。但它们可能会在宇宙微波背景辐射中——也就是弥漫在天空中的大爆炸余晖中——留下细微的痕迹。

孤单磁极：寻找没有南的北

正如电荷分正负，磁极也分南北。但是，从最不起眼的条形磁铁到地球强大的内部发电机，磁极总是成对地出现。把一块磁铁切成两半，就像迪士尼电影里魔法师的学徒对他的魔法扫帚所做的那样，你就能打造两块完整的磁铁，每块都有一个北极和一个南极。

虽然没有人见过没有南极相伴的北极，或者没有北极相伴的南极，但是许多理论物理学家仍然对找到这样一个单极子抱有希望。首先，它将完成詹姆斯·克拉克·麦克斯韦在19世纪60年代整理的方程式。它们概括了这样一个观点：电和磁实为一体之两面，这“一体”便是作为基本力之一的电磁力。麦克斯韦方程组适用于单个的、自由移动的电荷，自然界中，这些电荷以粒子（如电子和质子）的形式大量存在着。类似的自由磁荷会给方程带来一种美学上令人愉悦的对称性，但是在没有任何观察记录的情况下，麦克斯韦放弃了美，在他的方程中排除了自由移动的单极子。

多亏了保罗·狄拉克，磁单极子得以回归。这位以不善言辞著称的英国理论物理学家痴迷于数学之美。1931年，狄拉克将量子理论的思想应用到麦克斯韦的经典电磁学中，指出即使整个宇宙中只有一个磁单极子，它的存在也能解释为什么我们看到的所有电荷都是同样大小的正电或者负电电量的整数倍。

40年过去了，物理学家们一直在寻找将电弱相互作用与强核力统一起来的方法。格哈德·胡弗特和亚历山大·泊里雅科夫分别证明了磁

单极子是必不可少的，否则这样一个大一统理论将允许粒子具有各种电荷。

对磁单极子的追求

从南极冰到月球岩石，研究人员到处寻找着磁单极子。但是我们最接近目标的一次是在1982年的情人节之夜。当时，物理学家布拉斯·卡布雷拉利用加州斯坦福大学一个地下室里由他自己安装的一部磁单极子探测器，观察到了一个有希望的事件。后来证实，那不过是一场雁过未留痕的露水情缘，促使一些人在整整一年后送给卡布雷拉一条爱心留言：“玫瑰是红色的/紫罗兰是蓝色的/现在是时候/与磁单极子再次相约了。”

如今，卡布雷拉的磁单极子和其他一些更加可疑的观测结果被认为是实验误差。但是狄拉克的计算为磁单极子的缺失提供了现成的借口。计算结果表明，电荷的单位越小，磁荷的单位就必须越大。因为基本电荷是如此之小，而基本磁荷是如此之大，所以一个粒子必须拥有难以置信的能量才能携带它。

根据标准模型，唯一有足够的能量使磁单极子得以大量存在的时间是在大爆炸之后极其短暂的一刹那。人们认为，宇宙迅猛膨胀的时期，也就是所谓“暴涨”，差不多也在那一刹那开始了，而这将会把磁单极子分散到四面八方。加州理工学院的理论物理学家约瑟夫·波钦斯基说，搞不好在整个可见宇宙中只有一个磁单极子。

不过也有人希望它们能更常见一些。在大型强子对撞机上，阿尔伯塔大学的吉姆·平菲尔德正在通过一项名为“大型强子对撞机上的单极子和系外探测器”的实验寻找它们。它的主要组成部分是一系列金属

盒，附着在平台周围的墙壁上。每个盒子都接出一卷拖到地板上的金属丝，黄色胶带整洁地勾勒出它们的位置。

在每个金属盒子里都有一个探测器，探测器由一沓堆叠起来的塑料层构成，这些塑料层起到照相底板的作用。因为单极子必然携带巨大的磁荷，所以它会撕开塑料的聚合物键，蚀刻出一条轨迹，其大小、形状和排列方式将揭示粒子的特性。

尽管大型强子对撞机产生的迷你火球是迄今为止粒子加速器的产品当中能量最高的，但是如果你认可标准模型的预测，那么它们的能量还是远远不足以制造单极子。不过平菲尔德的实验并非徒劳。许多标准模型的改进版本都预测了一个更轻的单极子。

磁单极子应该是稳定的，因此平菲尔德的实验装置中还包括捕获探测器。任何经过的磁单极子都可能被装入瓶中，留作进一步的测试——这是粒子“动物园”中真正的异类。

我们在哪里可以找到磁单极子？

对磁单极子的搜寻意义深远。以下是我们寻找过却无果的地方：

被困在.....

- 阿波罗11号任务采集的月球岩石
- 南极陨石
- 火山岩

途经.....

- 寻找高能中微子和宇宙射线的实验
- 专用磁单极子探测器
- 宇宙微波背景辐射

制造于.....

- 粒子对撞机
- 磁性材料

9 引力点滴

在我们目前对自然界基本力的最佳模型中，引力是一个明显的遗漏。我们已经发现一些很有前途的探索途径，但是我们到底有多么接近万有理论了呢？

仍然没有万有理论

粒子物理学的标准模型从量子场论的角度描述了自然界的大多数基本力：飞掠的虚玻色子携带这些力。然而它并没有囊括引力。我们用的是爱因斯坦的广义相对论，以完全不同的术语将引力描述成弯曲时空的结果。

要想完全理解黑洞和宇宙的起源，我们似乎必须建立起一套针对引力的量子理论。在上述两个情境中，引力太强大了，以至于广义相对论也崩溃了，得出的每一个答案都是无限。这样的理论应该能让我们对空间和时间的本质有更加深刻的认识。

然而，当你坐下来尝试用量子场论描述引力时，你很快就会遇到一个大问题。对任何量子粒子过程的计算都是极其复杂的，因为你必须把产生虚拟粒子的无数种方式全都加起来。有时候，所有这些过程的总和是有限的，但也有一些时候它会失去控制，给你一个无穷大的结果。例如， β 衰变的量子理论给出的结果就是无穷大——直到物理学家们发展出电弱理论。通过加入大量未被发现的大质量粒子，比如W、Z和希格斯玻色子，人们消除了无穷大，数学上的困境得以解决。

这一成功让物理学家们相信，这种策略就像是发展量子理论的通用处方：如果模型产生了无穷大，你就可以添加质量更大的新粒子来解决问题。假设引力是由被称为引力子的量子粒子构成的，就像光是由光子构成的一样。当我们对所有可能的历史进行加和时，计算结果

如预期那样迅速地螺旋上升，陷入了一堆乱七八糟的无穷大（见图9.1）。

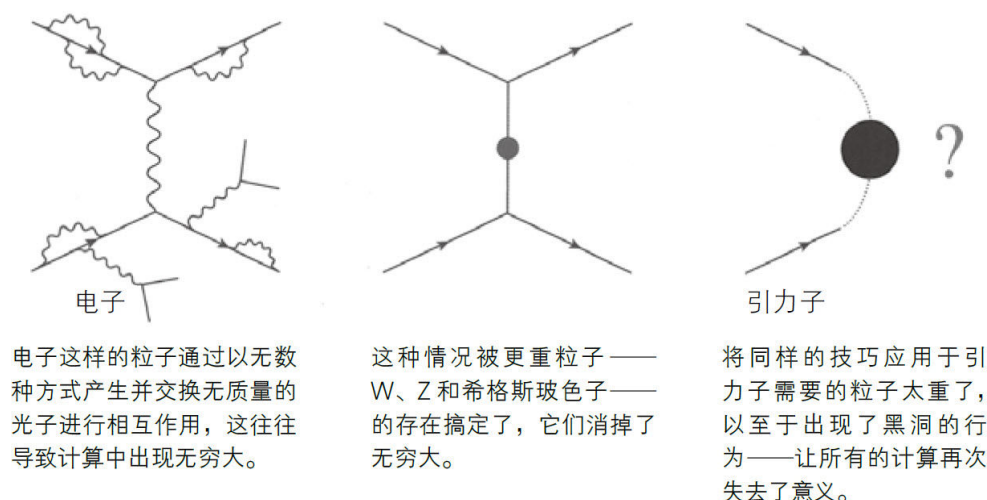


图9.1 引力子是假想的引力量子粒子——但是与之配套的理论很难驾驭

这一次，要想消除无穷大，人们需要发明一个质量相当于质子1000亿亿倍的新粒子。与所有的虚粒子一样，它们必须通过再次消失来偿还能量——借得越多，就必须还得越快，于是这些粒子的寿命非常短。它们走不了多远，因此只占据极其微小的空间。那么小的空间里有那么大的质量就会形成一个黑洞——包含一个密度无穷大的奇点。

在尝试绕过这一基本障碍的过程中，我们提出了一些候选理论，比如假设所有粒子都是更基本的振动弦的表现形式的弦论，以及主张时空本身被分割成离散块的圈量子引力论。

弦之声

在传统的量子场论中，宇宙是由没有大小、形状以及结构的基本粒子构成的。在超弦理论中，物质的组成部分变成了一维的弦，它们存在于一个十维的宇宙中。与其他四个维度不同，那几个额外的维度都卷曲成一个小得看不见的圆圈。事实上，它们直径约 10^{-35} 米，即便使用当今最强大的粒子加速器，它们也会因为太小而无法被探测到。

就像小提琴弦一样，超弦可以在不同的模式下振动。我们把每一种振动模式看作是一种不同的基本粒子。弦理论是将强力与弱力以及电磁力统一起来的一种方法，但它远不止于此。弦理论是引力的量子理论，因为弦的振动可以描述引力子——承载引力的假想粒子。更妙的是，弦之间的相互作用在某种意义上比点状粒子之间的相互作用更平滑，因此弦理论消除了先前将量子场论应用于广义相对论时遇到的无限大和反常现象。

得益于艾德·威顿在20世纪90年代的研究，弦理论现在已经被纳入M理论。这是一个无所不包的数学框架，存在于十一维时空当中。它涉及被称为p膜的高维扩展对象，其中弦只是一个特例。

那些额外维度弯曲的确切方式决定了我们这个四维世界的外观：包括有多少代的夸克和轻子，存在哪些力，以及基本粒子的质量。M理论的一个令人费解的特点是，那些维度有很多卷曲方式，从而产生大量可能的宇宙。所以可能存在着很多宇宙，各自有不同的物理定律，其中一个恰好就是我们所生活的宇宙。

当然，M理论仍然没有得到证实，但是它已经取得了一些成功。例如在1974年，斯蒂芬·霍金证明，由于量子效应，黑洞可以辐射能量，这意味着它们有温度和另一种叫作熵的热力学性质——熵是一种衡量系统无序程度的指标。霍金证明了黑洞的熵取决于它的面积。通过考虑构成黑洞的粒子的所有量子态，我们应该有可能计算出它的熵，然而所有以这种方式描述黑洞的尝试都以失败告终——直到M理论出现，准确地再现了霍金的熵公式。

对于超弦理论来说，大型强子对撞机的结果中缺少超级伙伴是坏消息吗？

“超弦”中的“超”指的确实是超对称性，这是该理论的一个重要组成部分。到目前为止，大型强子对撞机还没有发现过任何超级伙伴。这个事实常被当作质疑超对称性的理由，然而事实上，只有超对称理论是级列问题解决方案（[见第8章](#)）的时候，这样的轻超级伙伴才是必需的。如果超对称性的证据只会在能量更高的条件下出现，弦/M理论仍是与之兼容的。

当圈变成弦

我们最有希望的两个量子引力理论已经竞争了几十年。如果它们其实是一回事呢？

弦理论也许很成功，但它也有自己的烦恼。它的额外维度折叠的方式太多了，以至于一些批评者说它几乎没有预测能力，因此不能算是一门科学。与它竞争的圈量子引力认为，时空本身必须量子化，或者说由有限的块组成。人们通过计算得知，这些大块原来是虚无的小圈，它们自己演化成一种类似气泡的几何形状，被称为自旋泡沫。自旋泡沫本质上就是时空，只不过是用量子力学的语言来描述的。

除了调和量子理论和广义相对论，圈状时空并无更多企图——这是一种缓慢而稳定的方法，一些人认为更有可能带来可靠的进展。尽管圈仍然像弦一样是理论性的，一些圈理论物理学家，比如法国马赛理论物理中心的卡洛·罗韦利，已经提出了一些可验证的预测（参见下面的“如何验证圈量子引力”）。尽管如此，还是有一个问题。自旋泡沫太过坚硬，很难贴合爱因斯坦宇宙的精神，也就是说，根据不同的观察者，空间和时间可以被挤压和拉伸。

几十年来，这两个阵营之间几乎没有交流，但是由于双方都没有成功地击溃对方，随着理论物理学家们开始在这两个阵营之间流动，情况正在发生变化。2011年，波兰华沙大学的诺伯特·博登多弗及其同事在圈量子引力理论描述的时空中重写了弦理论及其超对称粒子，于是两个理论之间出现了关联。3年后，另一个关联出现了。圈理论支持者、乌拉圭蒙得维的亚共和国大学的罗道夫·甘比尼和美国巴吞鲁日

市路易斯安那州立大学的乔治·普林认为，要想让相对论和圈量子引力完全兼容，我们必须使用来自弦理论的一种几何结构去限制可能粒子的范围。

全息原理

早在20世纪90年代早期，就有过两者之间存在更紧密联系的线索。当时，乌特勒支大学的格哈德·胡弗特和斯坦福大学的莱昂纳德·萨斯坎德提出了全息原理：我们生活的三维世界可能只是发生在宇宙边缘的扁平二维过程的投影。他们在三维引力理论和二维量子场论之间建立了数学上的对应关系。在这个激进的想法中，我们所知道的宇宙就像信用卡背面的平面全息图所创造的三维图像。从那时起，全息原理已经发展成为弦理论的一个主要研究领域。理论物理学家们发现，从边界的角度来看，困难的物理学开始变得更加容易理解。

现在看来，这个边界提供了一个让弦理论与圈量子引力密不可分的地方。2015年11月，圈理论支持者、法国巴黎大学的瓦伦丁·邦宗和加拿大普里美特理论物理研究所的比安卡·迪特里希识别出某一项其他人曾经在弦论的背景下实施的全息引力计算，发现用圈量子引力也可以推导出同样的结果。一个月后，博登多弗有了另一个突破。通常，当全息弦理论被用于计算引力时，它会困在像黑洞这样的奇点上。但是博登多弗证明他的数学方法可以弥补这些情况。

更多的基础研究也正在参与进来。2016年11月，加拿大滑铁卢市普里美特理论物理研究所的理论物理学家劳伦特·弗赖德尔与另外两名合作者一起回归基础，用广义相对论来描述一个非常简单的场景：一个被边界包围的小空间区域。结果表明，定义其边界的变量在数学上

与弦理论和圈量子引力有相似之处，尽管这两种理论都不是计算的起点。

与此同时，美国博卡拉顿佛罗里达大西洋大学的圈理论支持者韩慕辛与中国上海复旦大学的弦理论支持者孔令欣合作，试图计算一个自旋泡沫在圈量子引力中演化成另一个的概率。就像洗澡时翻腾的肥皂泡一样，自旋泡沫也在自发地演化——这种自发性有助于解释时间的起源。韩慕辛和孔令欣将他们的计算映射到一个边界上：再一次，与弦论有着奇怪相似性的数学特征出现了。

如果这些研究朝着正确的方向发展，那么有可能至少在一个边界上，弦理论和圈量子引力根本不是竞争对手，而是完全等效的。然而这个界限是什么？在哪里？全息理论始于对宇宙尽头一道边界的想象，不过今天的弦理论和圈理论支持者们并没有严格遵守这一要求，认为边界存在于空间的任何位置。在时空中随机选取一个片段，他们的圈-弦物理学便可能会出现在最细微的尺度上。

“这听上去似乎有些武断。但是你仔细想想看，”罗韦利说，“我们一直在强行树立边界，作为观察世界的入口。为了记录光，我们用摄影胶片或者电子探测器或者视网膜捕捉光子。这张扁平的图片可能是多个物体同时出现的结果，就像一只蝴蝶的影子，可能是由一只真正的蝴蝶产生的，也可能是你勾连起两手拇指然后挥动其他手指产生的。”弦理论和圈量子引力在我们眼里也许不是一回事，但是在某种意义上，它们可能投下了相同的影子。

对于圈和弦之间的调和可能会带来什么结果，较年轻的物理学家们怀有一种发自肺腑的兴奋。即使本身不以量子引力理论为结果，至少它有可能为我们指明方向。

如何验证圈量子引力

最近，圈量子引力理论发展得顺风顺水，支持它的理论物理学家们至少做出了两个可以验证的预测。

- **反弹的黑洞**——卡洛·罗韦利是这个想法的先驱。如果空间本身是由离散的圈构成的，那么到了一定程度它就不能再被挤压了。这使他认为黑洞可能抵达了无法变得更加致密的那个程度，然后它们会反弹并产生可观测到的辐射。

- **来自大爆炸的信号**——大爆炸是另一个空间非常紧凑的时期，可能存在的最小时空颗粒是很重要的。我们也许能在大爆炸的余晖，也就是宇宙微波背景辐射中看到它们的效应。等到发展出比现在更精确的测量手段，我们也许能够探测到它们的特征。

10 大型强子对撞机的继任者们

在更深入地研究粒子物理学的征程中，地球上最大的机器还能获得什么改进吗？

未来对撞机：直来直去？

什么可以取代大型强子对撞机？两个最有可能的继任者是国际直线对撞机和紧凑直线对撞机。两者都要用电子和正电子实施对撞。国际直线对撞机的建议是35千米长的直线加速器，碰撞能量为1万亿电子伏特，而紧凑直线对撞机将使用一种只接收过较少测试的技术，使能量达到3万亿电子伏特。为了产生加速粒子的高频电场，国际直线对撞机将使用铌制成的超导谐振腔，而紧凑直线对撞机计划使用平行电子束产生射频场。

即使是3万亿电子伏特的碰撞能量也比大型强子对撞机低。然而蛮力并不是一切。大型强子对撞机对撞质子，每个质子由3个夸克组成，这3个夸克飘浮在一团携带力的胶子和短寿命夸克对当中。这意味着被大肆宣扬的能量其实要由不同的部分瓜分。质子的复杂性意味着它们并不是称手的工具：当两个质子相撞时，结果是一团令人困惑的碎片。

撞向正电子的电子是单点状的粒子，这使它们成为更加好用的工具。它们携带着机器宣称的全部能量，而在质子对撞机中，制造新粒子的能量只是由两个夸克或者胶子携带的一小部分。另外，在大型强子对撞机中，对撞的夸克和胶子的状态是一个谜，而每个电子和正电子的确切能量和其他性质都可以提前知道。这使得我们有可能计算出希格斯粒子和其他任何可能被抛出的奇异粒子的精确属性。

之前的电子-正电子碰撞记录是在大型正负电子对撞机上创造的。那座加速器曾经占据着一条27千米长的隧道，而现在那条隧道容纳的

正是大型强子对撞机。电子和正电子在大型正负电子对撞机中转圈，逐渐被提升到1000亿电子伏特的能量。要想达到更高的能量，环并不实用，因为转圈的电子会通过一种所谓的同步辐射过程迅速损失能量。电子飞得越快，它们的能量流失得就越快。这就是为什么物理学家们现在把目光投向了线性加速器。制造平直的路径，便不会有同步辐射造成的损失，于是人们打算让两个独立的加速器针尖对麦芒。

窄束

聚焦粒子束本身也会产生问题。在环中，你可以让反向旋转的电子束和正电子束以你想要的频率交汇，所以粒子有很多机会互相碰撞。在线性对撞机中，它们只有一次机会。解决方案是将粒子束聚焦到只有几纳米宽。这样一来，每个电子都会遇到密度很大的一团正电子（反之亦然），因此会发生大量的碰撞。这是个难以实现的目标，但是在斯坦福直线加速器中心和日本筑波的高能加速器研究机构实验室，必需的技术已经开发出来了。

大型强子对撞机的价格可能是200亿美元，资金也不太可能很快到位——特别是考虑到大型强子对撞机似乎只找到了一个相对简单的希格斯玻色子。物理学家曾经希望从大型强子对撞机中获得更多的新粒子，然后将这丰富的成果交给线性对撞机进行细致的筛选、检验。

也许有更好的选择。与电子差不多的 μ 子质量高达电子的200倍。这意味着它们发射的同步辐射要少得多，所以它们在环中可以比电子更容易加速到高能量。

在 μ 子加速器成为现实之前，还有一些技术障碍需要克服。 M 子是在 Π 介子的衰变中产生的，产生后呈炽热、随机移动的气态，需要先

冷却，然后才能聚焦成高密度的粒子束。不过类似的技术已经被用于冷却反质子，欧洲核子研究中心和费米实验室正在努力克服这些困难。

在紧凑直线对撞机和国际直线对撞机争夺资金和支持之际，中国提出了自己的替代方案。2014年，中国科学院高能物理研究所的科学家们宣布，计划建造一个相当于大型强子对撞机两倍大的粒子对撞机，其地下的环状结构直径将超过50千米，用来对撞电子和正电子，而且同一隧道中还要建造一个质子-质子对撞机。他们的目标是在21世纪30年代之前建成这一设施。

下一代探测器简表

国际直线对撞机

- 现状：本实验设计蓝图于2013年6月发表。
- 简介：一条35千米长的直线加速器，用来撞击电子和正电子。
- 成本：80亿美元。
- 优点：更加干净利索的碰撞；技术可靠，易于理解。
- 缺点：在某些情况下，最大能量可能不足以探测出所有人们感兴趣的物理新疆域。
- 地点：仍有待决定，不过日本北上山地区最有希望。

紧凑直线对撞机

紧凑直线对撞机将是一个正电子和电子线性加速器，就像国际直线对撞机一样——而且它目前还没有得到批准——不过它的长度会短一些，而且碰撞的能量更高。一个高强度、低能量的驱动光束与碰撞粒子束平行运行。驱动光束积攒的能量会以快速爆发的形式被传送到主粒子束上。

- 现状：概念设计报告于2012年10月发表。
- 费用：没有正式估计。
- 优点：更加干净利索的碰撞；能量高，结构紧凑（国际直线对撞机需要140千米长才能达到同样的能量，因此要昂贵得多）。
- 缺点：新技术的研发仍在进行中。
- 地点：未知。

遥远的未来

其他的提议包括非常大型强子对撞机，它将有40万亿到200万亿电子伏特的碰撞能量，而且必须从头开始建造。人们还在考虑 μ 子对撞机和LHeC（用电子束和质子束相撞）。2014年，中国科学家宣布了一个两倍于大型强子对撞机大小的粒子对撞机，该对撞机有一条52千米长的地下环，用来对撞电子和正电子。他们的目标是在2028年建成这个设施。

小型继任者

在未来几十年里，建造一台比大型强子对撞机更庞大、更强大的机器可能是不切实际的。更重要的是，达到足够高的能量，使我们能够直接探测统一的自然力，可谓希望渺茫（见图10.1）。那么粒子实验物理学家们现在能做些什么呢？一个选择是追求精度，而不是力量。这就是一系列实验得以开展所基于的道理。这些实验以人们熟悉的粒子为研究对象，寻找异常行为的细微迹象——也就是那些可能暴露出新现象在施展影响的古怪之处。

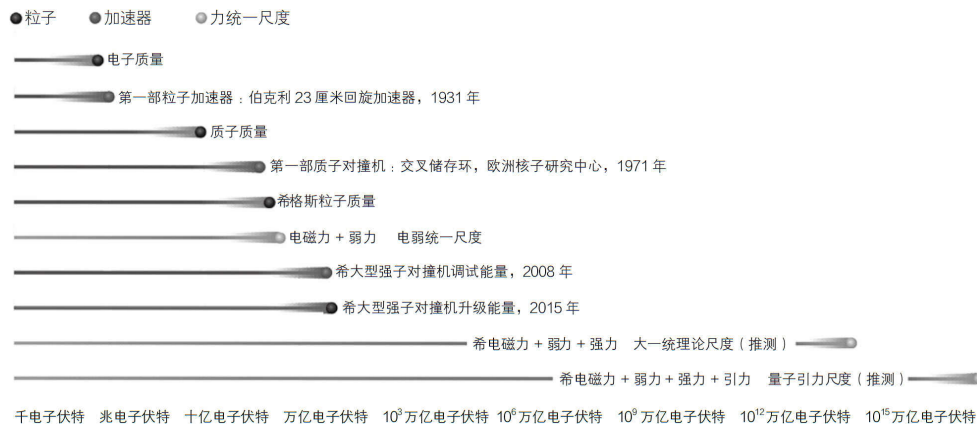


图10.1 粒子加速器已经征服了很多新的边疆，但是能量还远远不足以令自然力统一

电动挤压

标准模型预测电子和中子应该呈完美的球形。但是也许会有未知的奇特粒子对这些普通粒子产生一些微妙的影响，把它们压扁或者拉长。我们知道，普通粒子的性质受到附近存在的虚粒子的影响。如果其中一些虚粒子足够重，它们可能会给电子和中子造成一个电偶极矩：粒子内部正电荷和负电荷之间的轻微分离。这使它成为一个有吸

引力的目标，特别是对那些预算不怎么充裕的物理学家来说，因为寻找电偶极矩的实验往往规模较小、成本较低。

关键是要非常非常仔细地观察这些粒子的自旋。就像旋转的陀螺在受到引力造成的扭矩时，会随着转速的减慢而轻微摆动一样，一个粒子在电场中也会摆动——前提是它有电偶极矩。问题在于这样的摆动将极其细微，因此很难被发现。

哈佛大学的先进冷分子电子电偶极矩实验利用过冷的氧化钪分子放大粒子的变形，做出了对电子形状迄今为止最精确的测量。实验于2013年得出，这些粒子所拥有的任何电偶极矩都必须小于 10^{-30} 电子电荷米——这是正电荷和负电荷之间距离的量度。换句话说，如果电子和地球一样大，那么它与完美球体之间的偏差一定相当于从顶部削去一条不到10纳米宽的长条，然后把它拍在底部。

与此同时，田纳西州橡树岭国家实验室的nEDM（n代表中子）实验正在研究中子。先前的实验表明，中子距离完美球形有万亿分之一的偏差。通过将实验嵌入超流氦中，nEDM正试图将精确度再提高100倍。超流氦将使研究小组增加作用在中子上的电场强度，并使中子减速，从而大幅提升他们观察到变形的机会。

还有人建议探测一下质子的电偶极矩，以图寻找一种假想的暗物质粒子——轴子（[见第7章](#)）。

这些实验很容易受到大型强子对撞机可能无法直接观测到的粒子的影响。在其最大设计能量下，大型强子对撞机能找到的最重粒子大约是4万亿或者5万亿电子伏特。作为对照，如果那些粒子真的存在，先进冷分子电子电偶极矩实验可能已经在7万亿或者8万亿电子伏特的

能量级别上探测到了它们。团队已经提出了一些改进方案，可以将这一上限提高到40万亿电子伏特，进一步的调整可能会使这一上限升至100万亿电子伏特。

磁性异常行为

电子不太为人所知的表亲—— μ 子，15年来一直表现不佳。用不了多久，我们可能最终会发现是什么造成了它的桀骜不驯。

这两个粒子本质上都是旋转的电荷球，所以它们会产生磁矩——在我们看来就是一个北极和一个南极。1928年，保罗·狄拉克计算出，一个与磁矩有关的量——名为g因子——对于电子和 μ 子来说，应该正好是2。但是当我们在20世纪40年代测量电子的磁矩时，我们发现它稍微大了一点：差不多是2.002。

我们后来发现这是因为虚粒子造成了电子的磁矩不平衡。这一效应对 μ 子的影响甚至更明显，因为它的质量是其表亲的207倍。这使得它特别适合用于寻找新的重粒子，比如那些由超对称性预测的重粒子，因为它们应该也会献上自己的些许“绵薄之力”。

大多数观测到的磁矩差异来自已知标准模型虚粒子的影响，比如电子、正电子和夸克。但是在2001年，纽约厄普顿的布鲁克海文国家实验室的E821实验表明， μ 子的磁矩差异偏大，大约比标准模型给出的预测值高40亿分之一。这意味着可能有一些未被发现的重粒子影响着 μ 子的磁性。这一异常在统计学上并不显著，不足以被视为一项发现，而没等研究小组得到确认结果所需的数据，实验就被叫停了。不过一项名为 μ 子g-2的新实验给了我们另一个查明真相的机会。

2013年，E821实验使用的探测器——一个直径15米的巨大超导磁体环——被一艘驳船从纽约运到了芝加哥。如果一切顺利，该团队希望在2018年能够公布第一个证实布鲁克海文发现的结果。

不朽的粒子

质子是原子核的基石，根据标准模型，它应该是绝对稳定的：永远不会解体。但是大一统理论认为质子终将分裂。

超级神冈探测器是日本山区一个装着5万吨水的水缸（[见第6章](#)）。它最为人所知的是中微子实验，不过自1996年以来，超级神冈探测器也在关注质子分裂的迹象。这一事件可以通过反向射出的两束光得以揭示。

质子分裂有几种不同的方式，但最受欢迎的一种是衰变为正电子和 π 介子。2016年，超级神冈测出的在这一过程中质子寿命最精确限制被发表出来：下限 1.6×10^{34} 年。这个结果淘汰了某些类型的大一统理论。

人们提议的超级神冈的继任者是超拔神冈，它可以容纳100万吨的水。也许它最终会看到某个质子的死亡。

11 务实的粒子

粒子物理学不仅仅是对抽象真理的探索。它已经被用于寻找并杀死癌症、保护飞机机翼以及开发更好的超导体。有一天，中子科学甚至可能被用于阻止番茄酱从瓶子里一涌而出。

粒子物理学为我们做了些什么？

有人曾经说过，物理学可能会带来一些实用性的结果，但那并不是我们投身其中的原因。粒子物理学尤其如此，它的目标是通过在最高的能量和可想象的最小尺度下探测物质和力，从而更加透彻地洞察宇宙的本质。然而，就连古代的炼金术士也知道，将铅变成金的学问会是非常有用的（也就是有利可图），同样道理，粒子物理学家若是完全忽视他们的工具和发现对我们日常生活的影响，那也是愚蠢的。

就拿粒子加速器来说吧。最初，人们开发它们是因为希望能够在受控的实验室条件下重建宇宙射线——那样就能把理论物理学家和实验物理学家们带回地球。然而也许并不令人惊讶的是，制造和控制高能带电物质束的能力在其他一些领域也大有用武之地。例如，来自低能量加速器的电子束可以用来把黏性塑料变成更有用的东西。通过把一些氢原子轰出去，电子可以改变塑料高分子链的化学性质。这使得高分子链在一种叫作交联的过程中相互连接。你最终得到的材料是一种强度大得多的塑料，可以用来制造收缩膜和电气绝缘体。

我们还使用粒子加速器来产生X射线，用于机场安检扫描仪、食物保鲜，以及医疗设备消毒。在微芯片工业中，加速器被用来在硅中植入离子来制造更加精密复杂的元件。加速器也可能被用于炼金术——不是把铅变成金（这在技术上是可行的，但在经济上非常不划算），而是去灭活核废料。利用中子驱动的元素嬗变器，你可以用中子轰击不需要的放射性原子，它们就会变成更安全的同位素。这一手段已经被证明原则上是可行的，不过还需要改进，才能够以核工业所需的规模得到应用。

良药

在加速器应用推广的前沿，也许最令人兴奋的进展之一是医学物理学：用强子疗法治疗癌症。在很长一段时间里，人们一直使用X射线来杀死肿瘤细胞，但问题是它们同时也杀死了沿途照射到的所有其他组织。如果代之以高能质子或者碳离子，你就可以瞄准更明确的区域。考虑到质子和碳离子在穿过活体组织时失去能量的方式，你可以把它们安排到特定的深度去大显神威。在一些难以抵达或者敏感的部位，比如大脑和眼睛，强子疗法因此成为治疗肿瘤的有力工具。减少辐射剂量的需求也使它更适于儿童和其他脆弱的病人。这是诞生于粒子物理学的一项美丽而有效的技术。现在的挑战是把必要的加速器做得足够小、足够便宜，以便安装到每一家有需要的医院，就像核磁共振扫描仪和其他改变世界的设备一样。

粒子物理学的一项更奇特的发现——反物质——在医学领域也经常得到应用，那便是利用反物质的力量为身体内部情况造影的正电子发射断层扫描（PET）。要进行PET扫描，你需要服用一种物质，比如含放射性氟-18（顺便说一下，这种同位素也是在粒子加速器中产生的）的氟脱氧葡萄糖。它释放出一个正电子，与附近的电子发生湮灭，产生两束 γ 射线。你可以追踪这些 γ 射线在哪里出现，以确定相互作用发生的位置，这样就实现了对大脑和其他使用葡萄糖的身体部位的扫描。

粒子探测器则是另一则故事了。自20世纪初以来，人们窥探亚原子世界的能力一直有赖于捕捉粒子穿过某种敏感介质时留下的蛛丝马迹。查尔斯·汤姆森·里斯·威尔森的云室使用了过饱和的水蒸气，而塞西尔·鲍威尔在20世纪40年代开展的气球实验使用了一种特殊的光化学

乳剂。但是设置这些介质，然后拍摄和冲洗粒子轨迹照片，是非常令人厌烦的工作。年纪大一些的读者可能还记得，要先把胶卷从相机里拿出来，拿到药剂师那里去冲洗，然后才能拿着假期拍的照片去烦朋友和邻居们。为了发现正电子——电子的反粒子，卡尔·安德森不得不冲洗并分类了1300多张云室照片。不过公平地说，他确实也因为这番辛劳获得了诺贝尔奖。

就像我们差不多都转向了数码摄影一样，随着硅探测器的使用，粒子物理学的世界也发生了同样的变化。当一个电离粒子通过经过适当准备的硅片时，正电荷和负电荷被撞向四方，这样它们就可以直接输入探测器的电子器件中。由此产生的信号几乎立刻就可以得到处理、存储和分析，而不需要任何人工处理或者显影——2012年，处理大型强子对撞机发现希格斯玻色子所需的每秒数十亿次碰撞时，这样的技术可谓至关重要。

超级计算机

硅探测器带来的数据量爆炸意味着粒子物理学家必须发明新的计算方法。网格计算令世界各地几十万台计算机可以同时处理来自大型强子对撞机的数据流。20世纪70年代，本特·斯顿普用保龄球为欧洲核子研究中心的控制室设计了第一个跟踪球，并设计了最早的电脑触摸屏之一。这与蒂姆·伯纳斯-李发明的万维网完全不同。

正如你所预料的那样，这场数字革命给粒子探测器带来了以前无法想象的应用。衍生技术之一是Medipix混合硅像素探测器。与大型强子对撞机那些大教堂大小的实验装置相比，这种探测器是非常娇小的：一块拇指大小的硅片上有256像素×256像素的网格。但是，凭借

一些巧妙的微芯片工程，它可以被用来实时检测、计数和测量单光子的能量。

这对医学成像有着很大的影响。例如，通过观测穿过成像对象的不同能量的光子，你可以生成彩色X射线图像，为临床医生提供全新水平的诊疗信息。这种技术不仅可以应用于光子，任何电离辐射都可以立即被探测到并显示出来，比如放射性物质产生的 α 和 β 辐射，或者是强子疗法中使用的质子和碳离子。

粒子探测器也在进入太空。星际旅行的主要挑战之一是，一旦离开了对我们宠溺有加的地球磁场的保护，我们就会暴露在危险的辐射中。如果能够测量并理解辐射，我们就应该能够设计出解决方案，在下一代探险者前往火星或者比邻星或者别管哪里的下一个边疆时保护他们。现在，在国际空间站上，有5个Medipix设备正插在美国航空航天局的笔记本电脑上，测量宇航员的辐射环境。这些探测器也被用于美国的猎户座计划。该计划旨在用宇宙飞船将宇航员送入深空。因此，当我们在宇宙中寻找新的安身之所，为粒子物理学开发的技术可能会对我们这个物种的未来产生影响。

那么接下来呢？我们会不会制造出来希格斯玻色子驱动的翘曲驱动器、磁单极子单轨系统和微型黑洞废物处理装置？谁知道呢？我们做科学研究并不是为了给这些粒子找到应用，然而正如我们所看到的，只要你让足够多的人在一个地方工作——无论是欧洲核子研究中心、费米实验室还是其他什么地方——他们总会想出来一些伟大的东西。

大显身手的中子

詹姆斯·查德威克在20世纪30年代发现了中子，之后科学家们发现了中子在一种化学元素向另一种转化的过程中发挥的作用，并了解了核反应和放射性衰变是如何产生大量中子的。这引出了核链式反应的发现，并把物理学带入了前所未有的核能和核武器领域。

不过中子的故事还有另外一面。中子已经成为揭示物质结构的有力研究工具。如今，中子科学已经触及了一切：从下一代计算机到病毒结构。

和所有的量子粒子一样，中子也可以有波一样的行为。因此，遇到与其波长相当的障碍物时，它们会沿着明确的角度散射，就像水波在岩石周围绕射一样。通过分析散射模式，我们可以推算出中子穿过的物质的结构。

随着核反应堆在20世纪40年代的出现，中子的大量生产成为可能。人们得以对材料结构开展深入的研究。这一领域在20世纪60年代真正开始腾飞，当时人们为这类实验优化了研究用反应堆。

密集中子源

现在有20多个运作中的中子科学设施，可以归为两种形式。法国格勒诺布尔劳厄-朗之万研究所的高通量反应堆等研究用反应堆，利用核裂变来产生稳定、可靠的中子源。劳厄-朗之万研究所里运行着世界上最强大的中子源，为40部不同的仪器提供着中子束。与此同时，英

国迪德科特卢瑟福阿普尔顿实验室的ISIS中子源，是通过将加速的质子射入重金属目标来促使其发射中子。

像劳厄-朗之万研究所这样的设施可以在很大的能量范围内产生中子，而这对应着很大的波长范围。以每秒几千米的速度运行的热中子波长较短，可以用来研究直径小于1纳米的原子结构。冷中子的速度是热中子的1/10，对应的波长很长，可以用来研究微观尺度上的分子结构。

我们现在可以用中子来窥视各种各样的材料内部。因为自身不带电荷，它们不会因为离子的电荷偏转方向，可以深入物质内部。自旋给了它们一个小磁场，使它们能够与电子自旋相互作用，所以中子对于理解磁性材料的结构和动力学很有帮助。不过它们主要还是通过强力与原子核相互作用。这使得中子特别擅长于识别轻原子的位置，比如氢、氧和碳，因为它们的原子核质量之间有明显的差异。

许多日常用品，包括工具、衣服、食品和保健品，都是由含有这些轻元素的长链碳氢化合物构成的，而中子也是解析这些复杂结构的最佳选择。2012年，劳厄-朗之万研究所和英国布里斯托尔大学的一个研究小组利用中子研究他们能否通过在碳氢化合物链中纳入铁而使肥皂具有磁性。那样的肥皂可以利用磁场进行操控，从而改善水处理和环境净化技术。

随波逐流

其他某些常见的液体，比如面霜、洗发水和酱汁，由于其长链状分子的行为，会以不同寻常的方式流动。一种被称为剪切稀化的现象造成这些液体在被搅拌或者摇动时会变得更加稀滑。对于那些曾经试

图从玻璃瓶中倒出番茄酱，结果倒了一盘子的人来说，这是一个熟悉的过程。2005年，为了搞清楚为什么会发生这种情况，科学家们一边向各种液体施力，一边向它们发射中子束。中子揭示了分子的方向，而一个叫作流变仪的装置测量了液体的流动。研究结果在黏度和链方向之间建立了明确的关联，这一发现可以帮助行业预测和调整产品离开你手中的瓶子或者水池的方式。

蛋白质、病毒和细胞膜自然富含轻元素，生物学家和中子科学家一起破译这些生物结构及其发挥功能的方式。一种技术是氘化——用氘取代样品中的部分或者全部氢原子。氘是氢的一种重同位素，除了它的单个质子外，还有一个中子。中子散射对轻元素非常敏感，可以分辨出这两种同位素。接下来将样品与未氘化的样品进行对比，以确定氢原子在生化反应中的位置。

另一个受益的领域是将外来DNA引入宿主细胞，用于基因治疗和作物基因改造。利用中子散射，人们已经测试了许多可能的试剂，包括将DNA注入细胞的病毒。

中子也令人们得以深入了解细胞壁内胆固醇的运输。胆固醇包围着每一个细胞，参与信号在身体中的传递，并协助激素的产生。在细胞间和细胞内重新分配胆固醇，维持正常的胆固醇水平是至关重要的，因为阿尔茨海默病和心血管疾病都与胆固醇的异常有关。近年来，中子已经阐明了这些过程，揭示了细胞如何实现正确的平衡，以及什么因素会导致系统崩溃。

新药

除了辅助诊断，人们还利用中子制造新药。放射性药物是治疗某些肿瘤的最佳方法之一。他们将一种放射性同位素注入癌细胞，利用这一剂量的辐射杀死癌细胞。然而如今人们使用的放射性药物都是最容易获得的，而不是性能最好的，它们会对周围的健康组织造成不必要的损害。研究用反应堆现在被用来生产新的放射性同位素，如镱-177和铽-161。2015年，来自劳厄-朗之万研究所、德国慕尼黑工业大学和瑞士维里根保罗·谢勒研究所的一个团队演示了用中子辐照钆样品来大量生产铽同位素的新技术。钆-160吸收一个中子，生成一个较重的同位素，然后通过 β 衰变转变成铽-161。铽-161释放的 γ 射线刚好可以用来跟踪放射性同位素在体内的运动，它释放的低能电子可以在不损伤周围组织的情况下摧毁癌细胞。它的半衰期大约为一周，长到来得及送到医院，又短到不至于留下长期的核废料问题。

中子的磁性能被用来研究高温超导体，也就是能够不依赖电压传输电流的材料。研究人员正在研究这些材料中微小的自发电流环和自旋的交替模式。人们认为，电子之所以能够配对并且不受阻碍地移动，是因为这些现象发挥了一定的作用。如果能够揭示现存高温超导体的秘密，我们也许能制造出在室温下无电阻导电的材料。

这些多才多艺的粒子还可以解决那些你真心不希望出毛病的结构问题，比如飞机机翼、铁轨和涡轮叶片。这些材料的性质和性能在很大程度上取决于它们的纳米级结构。这种结构太小了，无法用普通的光学显微镜检测。凭借较短的波长，中子为人们提供了一种新的显微镜，用以了解压力对这些材料的影响，以及它们的性能如何能够得到改善以供日常使用。

寻找磁单极子

最后，还有磁单极子缺失这件事。物理学家们到处寻找磁单极子，从高能粒子碰撞的碎片到来自外太空的岩石（[见第8章](#)）。但是中子实验已经发现了一种磁单极子。2009年，两个独立的研究小组通过向一种叫作自旋冰的人造材料发射中子，发现了这一现象的证据。这些材料中粒子的自旋可以令它们自行形成南北磁极，而且这些磁极可以各自独立地飘移，类似于磁单极子。总有一天，这些伪磁单极子可以被用于制造一种比当今任何同类产品都要紧凑的计算机存储器。

中子期货

位于瑞典隆德的欧洲散裂源是世界上最大的中子科学设施。它被设计到一座线性加速器的周围，该加速器加速质子，使它们撞击一个重金属目标，从而释放出猛烈的中子脉冲。这些中子将通过束流线被引导到实验设施。

欧洲散裂源或许会成为中子科学的领头羊，不过其他设施也不会因为它的存在而变得多余，因为在药物发现、材料科学、可再生能源、基础物理和生物化学等领域有太多的科研工作有待开展。自从中子被人类发现，大概已经过去了80年，但是对于它那种给我们的世界带来彻底变革的潜力，我们仍然只是触及了皮毛。

结语

现在你可能已经明白了，粒子物理学不仅仅是对微小事物编目分类的枯燥操作。它回答了，或者说试图回答，一系列关于我们自身存在的问题，其中很多可以归结为字面意义上的“我们从哪里来”这一问题。一系列由粒子的精确行为所支配的非凡事件和环境，决定了构成我们自己的身体以及周围几乎所有事物的那些熟悉而复杂的物质。

在过去的几年里，我们至少找到了这个领域某些重大谜团的部分答案。晶格量子色动力学的精确计算说明了为什么质子的质量略大于中子。如果不是这样，就不会有化学元素了。2012年希格斯玻色子的发现证实了夸克和轻子具有质量的原因。没有它，后两者就会以光速运动，不可能结合在一起形成有结构的物质。

但是，还有更多的问题远远超出了我们目前的能力。为什么在早期宇宙中物质粒子战胜反物质，占据了优势地位？如果不是这样，宇宙就会只剩下一片温和的辐射海洋。什么是暗物质？没有它，我们就不会有恒星和星系。是什么决定了真空的能量？太高的话，整个宇宙都会分崩离析。轻量级的希格斯玻色子会造成宇宙不稳定吗？为什么我们的时空有三维空间和一维时间？是什么决定了所有力的强度？什么样的粒子恶作剧导致了剧烈的暴涨？什么引发了宇宙大爆炸？

别管会有什么样的理论取代标准模型，去解释物质的基本组成部分是如何相互作用的——无论是弦、圈还是其他更奇怪的东西——它都有很多工作要做。

50个想法

除了惯常的阅读列表，这一部分还列出了更多的材料，以帮助你更深入地探索这个主题。

7处景点及活动

1. 欧洲核子研究中心是世界上最大的物理实验室，也是著名的大型强子对撞机粒子加速器的所在地。那里提供带导游服务的游览机会：<https://visit.cern/tours>。可以在这个网站通过虚拟现实游览：<http://petermccready.com/>。

2. 位于加州的SLAC直线加速器据说是世界上最直的物体，如果大型强子对撞机太弯曲，不符合你的品位，那么SLAC会让你惊叹：<https://www6.slac.stanford.edu/public-tours>。

3. 英国伦敦威斯敏斯特大教堂有一座保罗·狄拉克的纪念碑，上面刻着以他的名字命名的方程，该方程暗示着反物质的存在。

4. 鹿特丹自然历史博物馆中陈列着2016年在大型强子对撞机上触电的某只石貂的遗骸。那次事故导致了粒子加速器暂时关闭。

5. 粒子物理学发展早期阶段的很多发现是在英国剑桥的卡文迪什实验室做出的，其中包括最早（有争议）的一项：约瑟夫·汤姆森利用阴极射线管识别出了电子。他们有一座博物馆：<http://www.phy.cam.ac.uk/outreach/museum>。你还可以在这个地址看到一部介绍那个天命所归的阴极射线管的短片：<https://www.newscist.com/article/2098394-the-tube-that-kic-of-particle-physics/>。

6. 用阴极射线做实验。你不必是剑桥的科学家也能做阴极射线实验。找一台旧的阴极射线管电视机和一块强磁铁。把磁铁放在屏幕

附近，粒子束的路径就会弯曲，使画面变形。

7. 与中微子（可能还有暗物质）玩耍。无论你是站着、坐着还是躺在什么地方，都要记住，每秒钟都有数万亿在太阳核心产生的中微子穿过你的身体，也可能有奇特的暗物质粒子在你体内穿行。

11条引言

1. “中微子穿过这片无垠虚空时真的击中什么的概率，大致相当于从一架巡航的747飞机上随意扔下一个滚珠轴承，结果击中一个，比方说，鸡蛋三明治。”——作家道格拉斯·亚当斯（1952——2001）

2. “正是电子不可能全部挤在同一位置这个事实使得桌子和其他东西如此坚固。”——物理学家理查德·费曼（1918——1988）

3. “将粒子分散成一根弦，是朝着让我们熟悉的一切都变得模糊的方向迈出了一步。你进入了一个全新的世界，那里的事物与你所习惯的完全不同。”——M理论先驱爱德华·威顿（1951——）

4. “我认为反物质的发现可能是21世纪物理学所有重大飞跃当中最重大的飞跃。”——沃纳·海森堡（1901——1976），量子力学的奠基人之一

5. “我犯了一个天大的错误，我预言了一个永远不会被观测到的粒子的存在。”——量子先驱沃尔夫冈·泡利（1900——1958）谈到中微子时说

6. “如果我能记住所有这些粒子的名字，我就去做植物学家了。”——意大利物理学家恩里科·费米（1901——1954），第一座核反应堆的建造者

7. “我想我可能会发现弦理论的普遍原理是最优雅的——如果我知道它们是什么的话。”——莱昂纳德·萨斯坎德（1940——），弦理

论的奠基人之一

8. “电子演奏着庄严的华尔兹，编织着线条优美的探戈，抖动着断断续续的快步，随着疯狂的节奏摇摆。它们是波，脚踏着为各种原子分别谱写的舞步。”——英国天文学家和作家爱德华·哈里森（1919——2007）在他1985年出版的《宇宙的面具》一书中写道

9 . “ 我 相 信 宇 宙 中 有
1574772413627500257760565396118155546804471791452711670936623
1425076185631031296个质子和相同数量的电子。”——英国天文学家
亚瑟·爱丁顿（1882——1944）

10. “从理论的角度来看，人们会认为磁单极子应该存在，因为数学上的优美。人们曾多次试图找到它们，但都一无所获。人们应该得出这样的结论：漂亮的数学本身并不是自然界符合一种理论的充分理由。”——预言了反物质的物理学家保罗·狄拉克（1902——1984）

11. “所有的科学要么是物理要么是集邮。”——“核物理之父”欧内斯特·卢瑟福（1871——1937）

6则双关语、笑话和逸事

1. 一枚质子走进酒吧。“我失去了我的电子。”它说。

“你确定吗？”招待说。

“我敢肯定/我是正的。”

2. 一枚希格斯玻色子走进教堂。

“嘿，没有我你们不许做弥撒/不能拥有质量⁽¹⁾。”

3. 一枚光子正在一家旅馆登记入住，看门人问他是否需要帮忙搬行李。“不，我轻装旅行/是行进中的光。⁽²⁾”

4. 约瑟夫·汤姆森出了名的健忘。有一天，汤姆森被同事说服，认识到自己仅有的一条裤子已经旧得没法穿，便在回家吃午饭的路上买了一条，并在下午上班前换上了新的。他的妻子回到家后，发现了那条旧的，便忧心忡忡地向实验室发送了一条消息，确信她的丈夫只穿着内裤离开了家，或者更糟。

5. “正如诺特敏锐的觉察

（对此她应该大受褒扬），

我们很容易看到，
对于每一个对称，
都必然有一个量守恒。”（戴维·莫林）

6. 提出中微子存在的沃尔夫冈·泡利极其注重科学的严谨性。他称一些论文和假设“完全错误”，然而这还不是最糟糕的形容：在一段有名的公案中，他把一个理论描述为“甚至不是错的”，因为它是不可验证的。

4次卓越的急智之作

1. 冷却大型强子对撞机会导致加速器的环收缩，因此各个分段之间由波纹管连接。成千上万个这样的部件被安装到位后，很明显，其中一些部件已经变形，并阻塞了粒子束的行进路线。然而是一个呢？有人想出了一个主意，把一个乒乓球放在管道里，这样它就会以每秒几米的速度在真空中滑行，直到碰到障碍物。当球撞上障碍物时，一个骑自行车的人可以听到声音。这种“传球”技术仍然被用来检查大型强子对撞机的粒子束路线是否畅通无阻。

2. 在费米实验室，可溶性阿司匹林片被用于检查万亿电子伏特加速器是否漏水。每个开关由一枚药片顶在开的状态上。如果有泄漏，它会溶于滴下的水中，导致开关跳闸，在发生损坏之前切断电源。

3. 明尼苏达州的低温暗物质搜索探测器必须保持在绝对零度以上不到一开氏度的温度，因此，它周围隔着一系列越往内越冷的层。为了避免各层之间接触造成不必要的升温，脱落的电线都被牙线系住。

4. 日本筑波市的高能加速器研究机构的研究人员可以随时食用类似明胶的魔芋面。这种食物的黏性意味着它们可以用作制造 μ 子探测器所需真空的测试密封材料。

9项事实

1. 大型强子对撞机的粒子碰撞产生的火球温度可以达到几万亿度（别管你采用哪种温标）。
2. J/Psi介子的发现证实了夸克模型。它拥有这么尴尬的名字是因为它是由两个团队分别独立发现的，一个团队将其命名为J，另一个团队将其命名为Psi。
3. 欧内斯特·劳伦斯在伯克利建造的第一个回旋粒子加速器直径只有大约10厘米。
4. 欧洲核子研究中心以无意中不幸触电的石貂而闻名，而费米实验室与动物的关系也很紧张。它的加速器曾经被一只猫（尾巴打断了一道安全光束）和一只浣熊（像大型强子对撞机的石貂一样咬坏了电缆）关闭，另外还遭遇过由老鼠、蛇、鹅和鹿造成的问题。麝鼠曾经排干了一个用来存放冷却水的池塘，导致主环加速器关停了一天。
5. 另有一则令人开心的故事：在20世纪70年代，费米实验室曾经雇用了一只名叫费利西亚的雪貂来清洁一段长真空管。
6. 轴子的英文名axion其实是一种洗衣液的品牌。命名者弗兰克·威尔切克选取这个词的原因是，人们希望这种新粒子能够“清理掉”物理学中的问题，同时词尾-on符合人们给粒子命名的习惯。
7. 在剑桥数学科目上获得一级荣誉的毕业生被称为“牧马人”，而最优秀的学生被称为“高级牧马人”。一些伟大的物理学家没能获得这

个浪漫的称谓，包括第二牧马人约瑟夫·汤姆森——电子的发现者，以及电磁理论的创始人詹姆斯·克拉克·麦克斯韦。

8. 2011年，大型强子对撞机遇到了UFO问题，不过这个UFO指的是“不明坠落物”而不是通常所指的“不明飞行物”。电离气体在束流室中产生的电子云和被称为“不明坠落物”的微尘粒子打断了束流，使大型强子对撞机难以持续运转。

9. 汤姆森因发现电子是粒子而获得诺贝尔奖，他的儿子乔治因证明电子是波而获得诺贝尔奖。不过他们并不是唯一的父子获奖者：另外还有5对父子获奖，包括量子先驱尼尔斯·玻尔和他的儿子奥格。

3条文化参考

1. 反物质在科幻作品中是一个流行的主题。例如，在《星际迷航》中，星际飞船进取号以反物质为燃料。

2. 更令人难以置信的是，反物质在电影《天使与魔鬼》中被用于推进情节。在影片中，光照派从大型强子对撞机偷取反物质来炸毁梵蒂冈。

3. 在电影《捉鬼敢死队》中，未经许可的粒子加速器为质子包提供能量。其发明者解释道，在使用这些设备时，让粒子束交叉是不明智的。相比之下，在大型强子对撞机上，那么做是必要的。

10个供进一步阅读的网站和书籍

1. 要想阅读一份非常短的粒子物理学简介，弗兰克·克洛斯撰写的《粒子物理学：一个非常短的介绍》（*Particle Physics: A Very Short Introduction*, 2004年）也许再合适不过了。

2. 2014年出版的《物理学七堂课》（*Seven Brief Lessons on Physics*）由卡洛·罗韦利撰写，是一本“清晰而迷人”的小书，先在意大利成为畅销书，随后风靡世界各地——理由很充分。

3. 要想更深入地研究粒子物理学的奥秘，大卫·格里菲思的《粒子物理导论》（*Introduction to Elementary Particles*, 2008年）是一本好教材。

4. 肖恩·卡罗尔2012年出版的《宇宙尽头的粒子》（*The Particle at the End of the Universe*）一书讲述了寻找希格斯粒子的过程（及其重要性）。

5. 另一本讲述希格斯玻色子发现过程的书是伊恩·桑普尔的《宏大：寻找上帝粒子》（*Massive: The Hunt for the God Particle*）。

6. 想要一本优秀的物理学游记，不妨试试阿尼尔·阿纳塔斯瓦米2003年出版的《物理学的边缘：揭开宇宙奥秘的地球极限之旅》（*The Edge of physics: A Journey to Earth's Extreme to Unlock the Secrets of the Universe*）。

7. 要想探究最古怪的物理学家之一，不妨读一读格雷厄姆·法梅罗的《最奇怪的人：量子天才保罗·狄拉克的隐秘生活》（*The Strangest Man: the Hidden Life of Paul Dirac, Quantum Genius*，2009年）。

8. 想要了解更多艾米·诺特那无人喝彩的才华和你可能从未听说过的最伟大的物理学定理，读一读戴夫·戈德堡的《后视镜中的宇宙：隐藏的对称性如何塑造现实》（*The Universe in the Rearview Mirror: How Hidden Symmetries Shape Reality*，2013年）。

9. 如果你更喜欢获得以巧妙折叠的形式呈现的信息，那就去看看安东·拉德夫斯基和艾玛·桑德斯合著的《通往物质之心的旅程》（*Voyage to the Heart of Matter*，2009年），这是一本关于欧洲核子研究中心的超环面仪器的弹出式书籍。

10. 如果你想为粒子物理事业贡献一些多余的计算能力，请访问 LHC@home。

名词表

ALICE “大型离子对撞机实验”（A Large Ion Collider Experiment）的缩写，这是大型强子对撞机的七个探测器实验之一。设计它的目的是研究在极端能量密度下强力的物理性质。

反物质 这是一种由反粒子组成的物质。每种粒子都有一种与之质量相同但电荷相反的反粒子伙伴。例如，电子有带正电荷的反电子，或者叫正电子。

ATLAS 超环面仪器（A Toroidal LHC ApparatuS），大型强子对撞机的两个通用探测器之一。它的研究范围很广，从寻找希格斯玻色子到可能构成暗物质的粒子。它与CMS实验（见下文）有着相同的科学目标，但使用了不同的设计。

大爆炸 根据大爆炸理论——我们对空间膨胀的最佳解释，大约138亿年前，整个宇宙从一个超热的微观区域一爆而生发。

玻色子 携带自然力的粒子。根据量子力学，玻色子是两类粒子（另一类是费米子）中的一类。二者由一种叫作自旋的特性来区分。玻色子自旋为整数。

CERN 欧洲核子研究中心（Conseil européen pour la recherche nucléaire）的首字母缩写，位于日内瓦附近的法国-瑞士边境。

CMS 紧凑 μ 子线圈，大型强子对撞机的通用探测器。它使用一个巨大的螺线管磁体来弯曲大型强子对撞机中对撞后生成的粒子的路

径。

暗能量 被认为是宇宙的主宰者，约占宇宙所有成分的68%，并导致宇宙以越来越快的速度膨胀。

暗物质 一种神秘的物质，约占宇宙所有成分的27%，远远超过普通物质，作为一种引力黏合剂，促成了恒星和星系的形成。

电磁力 带电粒子之间的相互作用。电磁相互作用是四大基本相互作用之一（另外三个是引力、强核力和弱核力）。

电子 一种带负电荷的亚原子粒子。

基本粒子 不可再分的粒子。

费米子 自旋为 $1/2$ 的奇数倍的粒子，比如电子和质子。

味 科学家们用这个名字来描述同一类型粒子的不同版本。

广义相对论 将狭义相对论和等效原理结合而成的引力理论，由爱因斯坦在1915年提出。物体弯曲时空，使其他事物加速向它们靠近。

胶子 这些无质量的粒子携带着将夸克结合在一起的力量。

引力子 量子理论中传播引力的假想粒子。

引力 已知四种自然力中最弱的一种，也是唯一没有用标准模型解释的一种。在宇宙尺度上，它似乎很强大，因为它是长程力，而且总是相互吸引而非排斥。

强子 由夸克和反夸克组成的亚原子粒子，由强力结合在一起。最著名的强子是质子。

希格斯玻色子 标准模型的一种基本粒子。其他粒子通过与其相关场的相互作用获得质量。希格斯玻色子最初是在1960年被提出，最终在2012年被发现。

希格斯场 分布于整个空间，并以不同强度与粒子相互作用。与之相互作用越强，粒子看起来就越重。有些粒子，如光子，根本不与希格斯场相互作用，因此没有质量。

轻子 一类基本粒子。电子、 μ 子和 τ 子是轻子家族中带电的成员，而三种中微子是它们不带电的伙伴。

LHC 大型强子对撞机，世界上最大的粒子加速器，位于日内瓦附近的欧洲核子研究中心。

LHCb 大型强子对撞机底夸克实验通过研究一种叫作美夸克或者底夸克的粒子，探索物质和反物质之间的细微差别。

Linac 直线粒子加速器（linear particle accelerator）的缩写。

圈量子引力 这一理论试图将广义相对论与量子力学结合起来。它认为时空必须符合量子的概念：它必须由大小有限的块构成，而不是连续的。这些小块其实都是些微小的圈。

磁单极子 孤立的磁极。理论上存在，但是尚未在自然界中发现。

M子 这种轻子的质量大约是电子的200倍。

超中性子 超对称理论预测的一种粒子，目前还没有出现在任何实验的结果中。

中微子 标准模型中不带电，几乎没有质量的粒子。它们有三种不同的味：电中微子、 μ 中微子和 τ 中微子。

中子 质量与质子接近但不带电的亚原子粒子。

核子 质子或者中子，是原子核的组成部分。

粒子加速器 将电子或者质子等粒子加速到极高能量的机器。机器中装备着磁体，用来集中和引导这些粒子束，使其碰撞。

五夸克 一种由5个夸克组成的粒子，在20世纪60年代被预测，最终在2015年被探测到。

光子 一种无质量的粒子，代表着电磁辐射或者光的最小单位。

质子 原子核中带正电荷的亚原子粒子，由3个夸克组成。

量子色动力学 描述把夸克凝聚在一起的强力的理论。

量子电动力学 描述带电粒子电磁相互作用的量子理论。

量子场论 用于为亚原子粒子建立量子力学模型的一个框架。

量子力学 在原子和亚原子层面上解释物理的定律。在那个层面上，粒子像波一样运动，可能同时处于几种状态，并且可以拥有跨越时间和空间将它们连接起来的共享状态。

夸克 这些物质的基石结合起来形成叫作强子的复合粒子，其中最稳定的是质子和中子。夸克有6个类型（或者味）：上夸克、下夸克、奇夸克、璨夸克、底夸克和顶夸克。

狭义相对论 根据爱因斯坦1905年提出的这项理论，运动、距离和时间都是相对的——这都是因为光速是恒定的。

自旋 一个粒子的固有角动量。

粒子物理学的标准模型 该理论涵盖了自然界4种力中的3种（电磁力、强力和弱力，不包括引力）的运作。它描述了物质的粒子——费米子——是如何感受到力，并通过交换被称为玻色子的其他粒子而相互作用的。

弦论 该理论认为所有的粒子都是更基本的振动弦的表现。

强核力 又叫强力、强相互作用，自然界4种基本力之一。它是质子和中子之间的力，也是组成它们的单个夸克之间的力。

超对称理论 标准模型的扩展，该理论认为每个粒子都有一个更重的“超伴子”，但其性质略有不同。

万有理论 包罗万象却又难以捉摸的物理学理论，统一了量子力学和广义相对论，并可以在一个单一的框架内描述自然界的所有力。

W玻色子 这种基本粒子和Z玻色子一起负责弱力。它是在1983年被发现的。

弱核力 又叫弱力、弱相互作用，是四大基本力之一，仅约为强力的一万分之一。它是放射性衰变的原因。

Z玻色子 一种不带电荷的基本粒子。Z玻色子携带弱力，和它带电荷的表亲W玻色子一样，是在1983年被发现的。

(1) 在英语中，mass既可以表示“弥撒”，也可以表示“质量”，因此have mass既可以理解为“做弥撒”，也可以理解为“拥有质量”。

(2) 在英语中，travelling light既可以表示“轻装旅行”，也可以表示“行进中的光”。



未读 Club

为读者提供有温度、有质量、有趣味的
泛阅读服务



专属社群 独家福利
精品共读 活动特权

手机扫码

加入未读 Club 会员计划